

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**DIPARTIMENTO**

di

**INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**TESI DI LAUREA**

in

**Motori a Combustione Interna e Ibridi M**

***“Sviluppo e validazione di un modello di invecchiamento del  
lubrificante per applicazione su motori a combustione interna”***

**CANDIDATO**

Michele Morara

**RELATORE:**

**Chiar.mo Prof. Nicolò Cavina**

**CORRELATORE/CORRELATORI:**

**Chiar.mo Prof. Davide Moro**

**Chiar.mo Prof. Enrico Corti**

**Ing. Francesco Boccia**

**Ing. Guillaume Sigaud De Bresc**

Anno Accademico 2018/2019

Sessione I



## Sommario

Introduzione .....	7
Capitolo 1 .....	9
Il perché di un modello di invecchiamento olio .....	9
<b>1.1) Motivazioni che hanno portato Ferrari a sviluppare un software di invecchiamento olio.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2) Obbiettivi principali del software .....</b>	<b>10</b>
Capitolo 2 .....	11
L'OLIO LUBRIFICANTE .....	11
<b>2.1) Il processo produttivo e la composizione dell'olio lubrificante .....</b>	<b>11</b>
- Olio base.....	11
- Additivi .....	12
<b>2.2) la classificazione degli oli .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3) funzione all'interno del motore .....</b>	<b>17</b>
Capitolo 3 .....	18
L'invecchiamento dell'olio motore .....	18
<b>3.1) Parametri in esame per lo studio dell'invecchiamento olio .....</b>	<b>19</b>
Neutralizzazione .....	20
Ossidazione.....	20
Soot.....	22
Acqua.....	22
Degrado Additivi .....	24
Diluizione .....	26
Shear Thinning .....	27
Metalli da usura .....	27
<b>3.2) metodi e strumenti di misura per l'analisi olio .....</b>	<b>29</b>
Analisi per titolazione TBN (total base number).....	29
Analisi per titolazione TAN ( total acid number ).....	29
Analisi IR.....	31

Analisi della viscosità.....	32
<b>3.3) Degrado olio per Ferrari.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4) Strumenti di misura adottati da Ferrari .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5) Scelta dei limiti per definire l'olio esausto .....</b>	<b>35</b>
Limiti per ossidazione. ....	35
Limiti per neutralizzazione .....	36
Limiti di viscosità .....	37
 Capitolo 4 .....	 38
<b>IDEAZIONE DEL SOFTWARE .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1) Analisi sperimentale al banco prova del degrado olio ed elaborazione dati .....</b>	<b>41</b>
Analisi sperimentale d'indagine ossidazione e neutralizzazione.....	42
<b>4.2) Creazione del modello Simulink .....</b>	<b>47</b>
Struttura software ossidazione.....	47
Struttura software TBN .....	48
Struttura software valutazione Viscosità .....	49
<b>4.3) fase di verifica preliminare del software .....</b>	<b>51</b>
 Capitolo 5 .....	 53
Applicazione del modello al banco prova e in vettura .....	53
<b>5.1) Analisi ossidazione .....</b>	<b>55</b>
<b>5.2) Analisi modello di Neutralizzazione .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3) Verifica analisi viscosità.....</b>	<b>73</b>
 Capitolo 6 .....	 77
Punti aperti per il futuro .....	77
<b>6.1) Indagine su influenza livello olio.....</b>	<b>77</b>
<b>6.2) Metodo di correlazione per espandere il modello a famiglie di motori diversi .....</b>	<b>78</b>
<b>6.3) correlazione variazione invecchiamento con usura motore.....</b>	<b>78</b>
<b>6.4) miglioramento mappa di TBN cold. ....</b>	<b>79</b>
 Conclusioni.....	 81
 Bibliografia.....	 84

Glossario.....	85
APPENDICE 1 .....	86
SCHEDE TECNICHE.....	86
APPENDICE 2 .....	89
NORME.....	89



## Introduzione

Negli anni recenti la sfida tra le grandi case automobilistiche si combatte a suon di buona progettazione, organizzazione, ma soprattutto, ottimizzazione dei costi.

Tutte le fasi della vita di una vettura, che hanno ripercussioni economiche sulla spesa aziendale, sono strettamente controllate.

L'esborso economico sostenuto dalle aziende per le operazioni di manutenzione ordinaria, durante il periodo di garanzia post-vendita, rappresenta un onere piuttosto sostanzioso.

Uno dei costi più importanti che le aziende devono affrontare riguarda la sostituzione del fluido lubrificante.

I costi per cambi olio inappropriati risultano onerosi non solo dal punto di vista della mano d'opera e della materia prima, ma anche sotto un'ottica più ambientalista, per l'impatto ambientale legato al suo successivo smaltimento.

Aumenta così, da parte dei produttori di autoveicoli, l'interesse sul processo di degrado olio.

Lo scopo è quello di poter garantire intervalli di manutenzione più lunghi possibile, senza pregiudicare l'affidabilità del motore.

Nella pratica non esiste un numero esatto di chilometri o di tempo trascorso che ci assicuri che il nostro lubrificante sia effettivamente giunto a fine vita.

E' lecito però pensare, che il degrado sia strettamente legato allo stato di stress che s'impone al fluido, e quindi, al tipo d'impegno che è fatto della vettura e al tempo di permanenza.

In questo elaborato entreremo nel merito del processo di invecchiamento olio. Tenteremo di analizzare questo fenomeno di scadimento delle caratteristiche fondamentali del lubrificante, nell'ottica di stabilire innanzitutto, cosa significa invecchiamento dell'olio e cercare di far chiarezza sui processi che lo generano.

Nota la fisica alla base del degrado, si potranno definire i parametri di maggior importanza e di conseguenza fissare limiti su di essi.

Questo permetterà di avere un metro di giudizio sui risultati, e verificare l'effettivo stato di usura del lubrificante.

Per migliorare l'analisi, mediante lo sviluppo di un software, sarà modellato il processo d'invecchiamento olio con lo scopo di avere un'analisi in tempo reale del degrado durante il funzionamento del motore .

Grazie all'impiego del modello, sia al banco prova sia in vettura, saremo in grado di verificare la corretta progettazione e migliorare la struttura di base.

L'obiettivo di questa fase sperimentale, sarà quello di verificare il corretto funzionamento del modello, e la sua capacità di generare stime affidabili per quanto riguarda lo stato d'usura del lubrificante.

## Capitolo 1

### Il perché di un modello di invecchiamento olio

#### 1.1) Motivazioni che hanno portato Ferrari a sviluppare un software di invecchiamento olio.

Per motori ad alte prestazioni, come quelli sviluppati in Ferrari, il funzionamento in condizioni ideali è assolutamente di primaria importanza.

La cura del cliente e del prodotto ha portato, negli ultimi anni, alla creazione del pacchetto di estensione garanzia Ferrari.

L'acquisto di questo pacchetto garantisce un'estensione dell'assistenza e manutenzione ordinaria per altri cinque anni oltre i due già previsti.

Questo comporta il farsi carico, da parte dell'azienda, di tutti gli oneri legati alla manutenzione per i primi sette anni di vita del veicolo.

La spesa economica diventa piuttosto sostanziosa ricordando che Ferrari, con circa 8.000 vetture vendute all'anno, si posiziona tra i leader di vendite nel settore.

Nasce così il bisogno di verificare l'effettiva necessità delle spese sostenute durante le operazioni di manutenzione ordinaria della vettura, una fra tutte il cambio d'olio.

A oggi il sistema di manutenzione Ferrari prevede la sostituzione del lubrificante ogni 20.000 Km o dopo un anno .

L'obiettivo, al quale si vorrebbe arrivare, è quello di poter variare gli intervalli di manutenzione.

Con lo sviluppo di un software in grado di stimare l'invecchiamento, sarebbe possibile indagare in che modo vengono a decadere le proprietà dell'olio in funzione al tipo di utilizzo imposto alla vettura e al tempo.

Com'è lecito pensare, queste vetture ad alte prestazioni sono impiegate in maniera del tutto differente rispetto alle vetture d'uso quotidiano.

Il chilometraggio medio annuo è molto più basso, si va dai 2.000 Km fino a un massimo di 12.000 Km l'anno, come riportato nella figura 1.1.

	612 SCAGLIETTI	599 GTB Fiorano	California	458 ITALIA	430 Scuderia	430 Scuderia Spider	F430	F430 Spider	575 SA
CHINA	4551	4771	6397	5031	3844	2891	6315	5981	2042
FAP	4178	3682	5000	3938	2886	2196	3845	4379	2746
FD	9410	7470	9832	9791	5765	6666	7513	7157	5419
FGB	8037	6837	7311	9349	5119	4247	5955	5695	4321
FNA	5189	3659	5828	4868	3432	3038	4333	3535	2790
FSuisse	7885	5571	9119	8504	6913	6873	6832	6494	5612
FWE	9968	7803	9311	8621	5923	6822	8153	8330	7582
ITALIA	10388	8544	10555	11145	6992	8972	8151	8572	5395
EU Diretti	7104	5686	7945	8528	6623	6210	7191	7550	6311
M. East & Africa	5915	5128	6701	6075	3780	3188	8545	7600	2170
Media Km Modello	7583	5706	7502	8815	5054	4470	6237	5525	4012

Figura 1.1) Km percorrenza media vetture in funzione dell'area geografica aggiornato al 2011;

L'azienda stima la possibilità di aver un guadagno, (dalla diminuzione dei costi fissi legati al materiale impiegato come, olio e filtri e dei costi variabili, cioè la mano d'opera specializzata) pari a qualche migliaia di euro a vettura all'anno.

Il software diventa quindi di strategica importanza in ottica riduzione costi.

## 1.2) Obiettivi principali del software

Nell'ambito della sperimentazione l'obiettivo che si pone il nostro software è di modellare un processo fisico e stimarne le conseguenze in termini numerici in modo da poter fissare limiti di soglia, rendendoci in grado di giudicare le condizioni in cui si trova a operare il lubrificante.

Tutto questo tramite l'analisi di alcuni parametri funzionali del motore come:

- Coppia
- Giri motore
- Temperatura olio

A livello aziendale lo scopo del software avrà un'importanza più tangibile, esso dovrà essere in grado di simulare, nel modo più accurato possibile, l'andamento dell'invecchiamento per essere impiegato come strumento decisionale e definire le future linee guida nell'ambito della manutenzione del circuito olio, limitando sprechi e costi superflui.

## Capitolo 2

### L'OLIO LUBRIFICANTE

Prima di entrare nello specifico del funzionamento del software è però necessario, fare luce sul processo produttivo, sulle composizioni dei lubrificanti, le classificazioni oggi vigenti e le funzioni principali svolte durante il funzionamento del motore da parte dell'olio.

#### 2.1) Il processo produttivo e la composizione dell'olio lubrificante

Il processo produttivo degli oli lubrificanti varia in funzione del prodotto che s'intende ottenere, di conseguenza, avremo processi produttivi con fasi e costi differenti.

In generale è però possibile definire due macro componenti alla base della struttura dei lubrificanti, olio base e additivi.

##### - **Olio base**

Rappresenta la componente preponderante nella maggioranza dei lubrificanti e la sua qualità è direttamente legata alle materie prime e al processo di lavorazione.

Le basi che compongono i lubrificanti possono a loro volta essere di diversa natura:

- **Basi minerali:** sono una miscela d'idrocarburi ottenuta mediante raffinazione del greggio o mediante processo d'idrogenazione media [2.a] ;
- **Basi sintetiche:** sono una miscela d'idrocarburi ottenuta a partire da processi di conversione molecolare che includono una fase di idrogenazione spinta, nonché tutti i tipi di basi ottenute mediante processi di sintesi chimica.  
Sono di qualità superiore e presentano un utilizzo in crescita, soprattutto nel settore degli oli motore.
- **Basi ri-raffinate:** sono ottenuti mediante processi di ri-raffinazione degli oli usati.

- Basi vegetali: sono ottenute mediante processi di trattamento chimico fisico di prodotti di natura vegetale.

Come già citato, gli oli di natura sintetica sono i preferiti in ambito automotive, in figura 2.1 è riportato il processo produttivo dal quale viene sintetizzato il lubrificante.

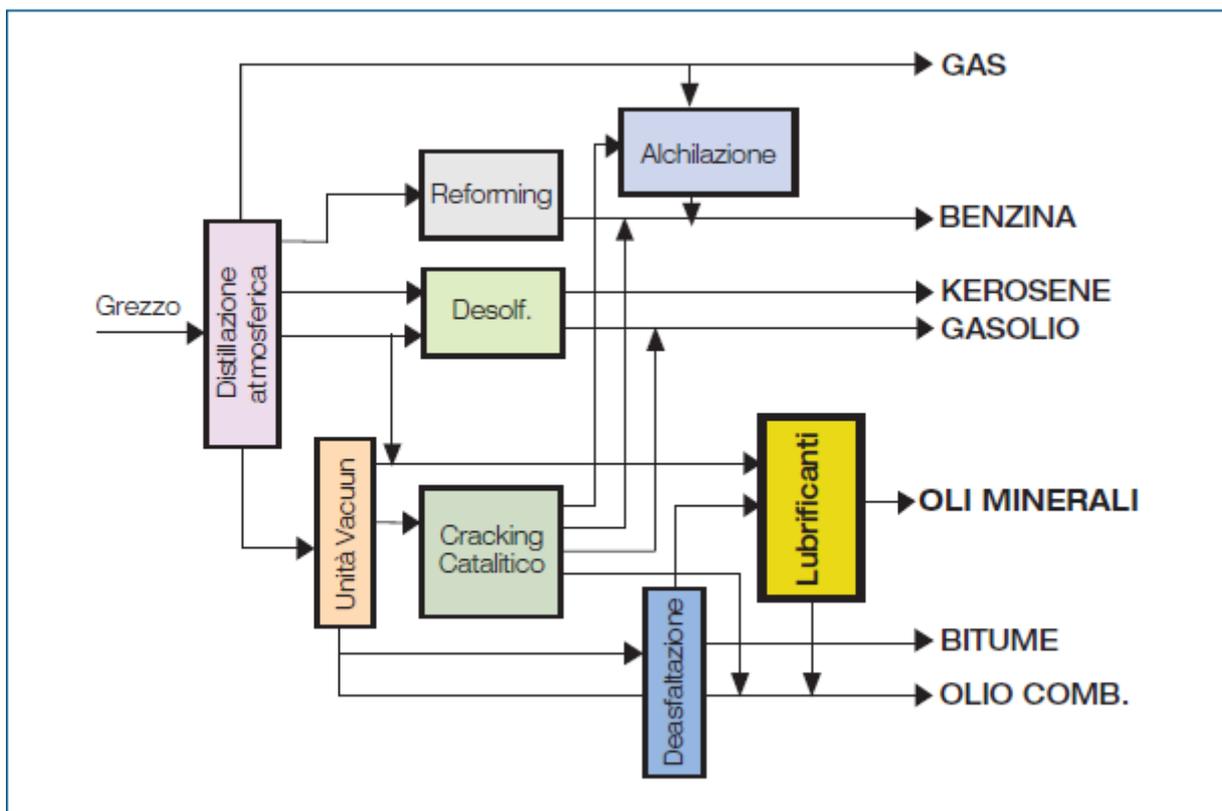


Figura. 2.1) produzione olio lubrificante;

#### - Additivi

Gli additivi sono quelle sostanze che, aggiunte agli oli base in quantità controllate, ne migliorano le caratteristiche al fine di ottenere un prodotto finito destinato ad applicazioni specifiche.

Gli additivi si possono classificare in base alle caratteristiche che presentano e possono essere riassunte in:

- **Modificatori dell'indice di viscosità:** in modo da mantenere una buona fluidità a basse temperature ed una elevata viscosità ad alte temperature.
- **Miglioratori del punto di scorrimento:** per abbassare la temperatura alla quale il lubrificante solidifica.
- **Antischiuma/ disemulganti:** evitano la formazione di schiuma quando l'olio è sottoposto a sbattimento, mantenendo così uniforme la pellicola lubrificante.
- **Antiusura:** svolgono la funzione di molecole lubrificanti le quali, ancorandosi alle pareti metalliche, resistono alle azioni disgregamento.
- **EP (estreme pressioni):** reagiscono con le superfici metalliche ad alte pressioni, formando delle sostanze solide lubrificanti che impediscono la saldatura dei picchi metallici a contatto.
- **Detergenti/disperdenti:** mantengono in sospensione i depositi (polveri, ceneri, residui carboniosi), impedendone la loro riaggregazione.
- **Anticorrosivi:** contrastano l'azione degli agenti corrosivi formando un film protettivo sulla superficie metallica.
- **Antiossidanti:** impediscono le variazioni di viscosità legate all'ossidazione e ne estendono il periodo di utilizzo.

Dalla miscelazione della base e degli additivi, accuratamente scelti in funzione dell'impiego che viene ad affrontare il lubrificante, si ottiene il prodotto finito.

Negli ultimi anni è stato sviluppato un terzo filone di lubrificanti, non derivanti dalla raffinazione del petrolio, si tratta infatti di lubrificanti di natura bio.

Questi bio-lubrificanti, possono essere classificati come fluidi con caratteristiche elevate di biodegradabilità e come prodotti di origine vegetale oppure ottenuti mediante una reazione di esterificazione [2.b] tra un alcol ed un acido grasso. Essi posseggono naturali proprietà di antiusura/antiattrito, un alto punto di infiammabilità e di combustione, un indice di viscosità molto elevato ed un basso punto di scorrimento.

## 2.2) la classificazione degli oli

Gli oli lubrificanti vengono classificati, oltre che per le qualità chimiche sopracitate, anche e soprattutto per la viscosità.

Si tratta di una misura della resistenza allo scorrimento di un fluido che tende ad aumentare al diminuire della temperatura e viceversa.

Le variazioni di viscosità differiscono per i vari tipi di olio e sono misurate mediante una grandezza appositamente definita, denominata indice di viscosità, che indica come varia la viscosità di un certo olio al variare della temperatura ed assume valori tanto più alti quanto minori sono le variazioni di viscosità al variare della temperatura.

Alla viscosità di un fluido è possibile legare i benefici in termini di perdite per attrito.

Essa permette alle superfici in movimento di sopportare un carico e opporsi al movimento relativo.

In funzione della viscosità vengono definiti vari sistemi di classificazione viscosimetrica che ne indicano un intervallo più o meno ristretto.

Lo scopo primario di queste classificazioni è di fornire, unitamente all'indice di viscosità, una rapida indicazione per la scelta del lubrificante più adatto a una data applicazione.

Le principali classificazioni riguardano gli oli per l'industria e l'autotrazione, le più comuni sono:

- ISO VG (International Organization for Standardization ) valida per gli impieghi in ambito industriale;
- SAE (Society of Automotive Engineers) valida per gli usi nel settore dell'autotrazione;
- AGMA (American Gear Manufacturer's Association) valida per gli oli da ingranaggi;
- SUS (Saybolt Universal Seconds) valida per i tagli di oli basse;

Per quanto riguarda gli oli impiegati nell'autotrazione, per stabilire una differenziazione in base alla loro viscosità ci si riferisce normalmente alla classificazione SAE J300.

In base a questo criterio gli oli vengono raggruppati sulla base di determinati limiti di viscosità che sono riferiti alle diverse temperature di funzionamento.

In tabella 2.2 viene riportata la classificazione SAE per gli oli impiegati in autotrazione.

Grado SAE	VISCOSITÀ A BASSA TEMPERATURA		VISCOSITÀ AD ALTA TEMPERATURA		
	Avvio (cP) max.	B.P.T (cP) max.	Cinematica a 100°C (cSt) min. max.		Stabilità al taglio a 150°C and 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup> (cP) min.
0W	6.200 a -35	60.000 a - 40	3.8	-	-
5W	6.600 a -30	60.000 a - 35	3.8	-	-
10W	7.000 a -25	60.000 a - 30	4.1	-	-
15W	7.000 a -20	60.000 a - 25	5.6	-	-
20W	9.500 a -15	60.000 a - 20	5.6	-	-
25W	13.000 a -10	60.000 a - 15	9.3	-	-
20	- -	- -	5.6	9.3	2.6
30	- -	- -	9.3	12.5	2.9
40	- -	- -	12.5	16.3	2.9 (0,5,10W-40)
40	- -	- -	12.5	16.3	3.7 (15,20,25W-40 e 40)
50	- -	- -	16.3	21.9	3.7
60	- -	- -	21.9	26.1	3.7

Tabella 2.2) classificazione SAE;

Il limite inferiore di viscosità indica la viscosità dinamica [2.c] a bassa temperatura e definisce i gradi SAE “W” (winter) da 0W a 25W e associa a tali gradi una valore di viscosità rilevata a temperature comprese tra -35 e -10. Queste temperature sono essenzialmente le temperature alle quali è possibile avviare il motore in condizioni di sicurezza.

Il limite superiore indica invece, la viscosità cinematica [2.d] misurata a 100° C e definisce gradi SAE da 20 a 60 con viscosità crescente.

I valori stabiliti dalla classificazione SAE sono espressi in centi-poise per la temperatura a freddo (W) e in centi-stokes per la temperatura a 100°C.

Per gli oli motore, i quali devono garantire il mantenimento delle caratteristiche in determinate condizioni di funzionamento, viene applicata anche una classificazione di tipo prestazionale, verificata sia con prove di laboratorio che test più pratici, mediante l’impiego effettivo in veicoli circolati.

Le prove in laboratorio si svolgono su motori al banco, che lavorano in condizioni particolarmente severe e secondo standard che simulano situazioni critiche di funzionamento. Vengono così controllate l’ossidazione, la formazione di morchie e di depositi ad alta temperatura nonché l’usura del sistema di distribuzione, dei cilindri e delle bronzine. Inoltre, viene monitorato l’ispessimento

da nerofumo ed il consumo di olio. Altre prove di laboratorio misurano la variazione di viscosità e la compatibilità con i materiali.

Le principali associazioni internazionali (API, ACEA, ILSAC e altre) hanno stabilito una classificazione basata sulle prestazioni (prestazionale), che è integrata con le specifiche proprie di ciascun costruttore. La classificazione adottata negli Stati Uniti e rilasciata dall'API (American Petroleum Institute), si divide in due gruppi: "S" destinata ai motori a benzina; "C" per quelli destinati ai motori diesel. Tali sigle sono seguite da una seconda lettera crescente che evidenzia le prestazioni del lubrificante. Il simbolo rilasciato dall'API è detto "Donut" e viene riportato sulle confezioni dei lubrificanti motori.

In Europa, l'ACEA (Association des constructeurs Européens d'Automobiles), l'associazione che riunisce tutti i maggiori costruttori europei di auto, ha definito le categorie e le applicazioni degli oli motore per autovetture a benzina con la lettera "A", per i diesel leggeri con la "B" e per i veicoli commerciali diesel con la "E".

Nell'ambito di ogni singola categoria di applicazione sono previsti tre livelli di severità. Nell'anno 2004 è stata introdotta la categoria "C" anch'essa suddivisa in tre livelli ("C1", "C2" e "C3"), compatibile con i sistemi più recenti di post-trattamento dei gas di scarico, che permettono di ottemperare alla normativa sulle emissioni Euro 4.

Questi tipi di lubrificanti consentono tra l'altro, il buon funzionamento nel tempo dei filtri anti-particolato (DPF o GPF) necessari per limitare le emissioni delle polveri sottili (PM10), tra i principali responsabili dell'inquinamento atmosferico.

I produttori di basi lubrificanti e di additivi sono costantemente impegnati nello sviluppare formulazioni che migliorino le performance sia dal punto di vista motoristico sia dell'impatto sulla salute e sull'ambiente. Queste attività rendono i prodotti molto diversi sia per la qualità sia, conseguentemente, per il prezzo.

### **2.3) funzione all'interno del motore**

La lubrificazione dei motori a combustione interna è generalmente più complessa di quella di qualsiasi altro macchinario, a causa dell'estrema variabilità delle condizioni di carico, velocità, temperatura e dei materiali che li compongono.

Per i motori a benzina l'area critica è la distribuzione, soggetta a fenomeni d'usura che possono avere conseguenze sulla corretta alimentazione e quindi provocare fenomeni collaterali dalle conseguenze disastrose.

Inoltre, il funzionamento tipico dei tragitti urbani, che comporta frequenti stop e ripartenze, porta alla formazione di morchie che possono intasare il circuito di lubrificazione.

Per i motori diesel, invece, l'area critica è rappresentata soprattutto dagli accoppiamenti cilindro-pistone a causa delle temperature di punta più elevate. Inoltre, lo zolfo del combustibile è una fonte potenziale di acidità corrosiva, mentre il nerofumo (soot) prodotto dalla combustione incompleta del carburante, tende ad aumentare la viscosità dell'olio oltre che a formare depositi.

Le caratteristiche principali richieste a un lubrificante impiegato in ambito automotive, sono:

- ridurre l'usura fra le parti in relativo movimento;
- assicurare una pulizia del motore mantenendo in sospensione le lacche (o gomme) e le morchie: quando l'olio è caldo, le sue proprietà detergenti prevengono la formazione di lacche, quando è freddo le sue proprietà disperdenti prevengono la formazione e il deposito di morchie;
- resistere al fenomeno dell'ossidazione nelle condizioni di esercizio del motore prevenendo un rapido deterioramento dell'olio;
- assicurare il mantenimento delle temperature d'esercizio degli organi interni del motore non raggiungibili dal circuito dell'acqua;

## Capitolo 3

### L'invecchiamento dell'olio motore

Per degrado s'intende qualsiasi variazione delle proprietà fisiche o chimiche del lubrificante, che comporta un decadimento delle prestazioni.

Nel corso di questo capitolo, cercheremo di analizzare in modo chiaro e conciso quelle che sono le proprietà principali su cui si valuta il degrado, e che andranno a decadere durante il funzionamento.

Le proprietà da preservare sono riassumibili in:

- Proprietà reologiche (Viscosità);
- Proprietà antiusura e resistenza alle pressioni di contatto;
- Stabilità chimica e protezione dalla corrosione;
- Proprietà detergenti e disperdenti;

La variazione di queste proprietà è legata al decadimento di certi parametri che saranno frutto di studi per la definizione e la comprensione dell'invecchiamento dell'olio.

### 3.1) Parametri in esame per lo studio dell'invecchiamento olio

I parametri che concorrono all'invecchiamento del lubrificante ovvero, alla variazione delle proprietà fisico-chimiche sopra elencate, possono essere riassunti in:

- **Neutralizzazione;**
- **Ossidazione;**
- **Soot;**
- **Acqua;**
- **Degrado additivi;**
- **Diluzione;**
- **Shear thinning;**
- **Metalli da usura;**

Per comprendere al meglio quanto il processo di degrado sia complesso e ampiamente articolato riportiamo in figura 3.1 le relazioni che intercorrono tra i parametri in esame e le proprietà del lubrificante.

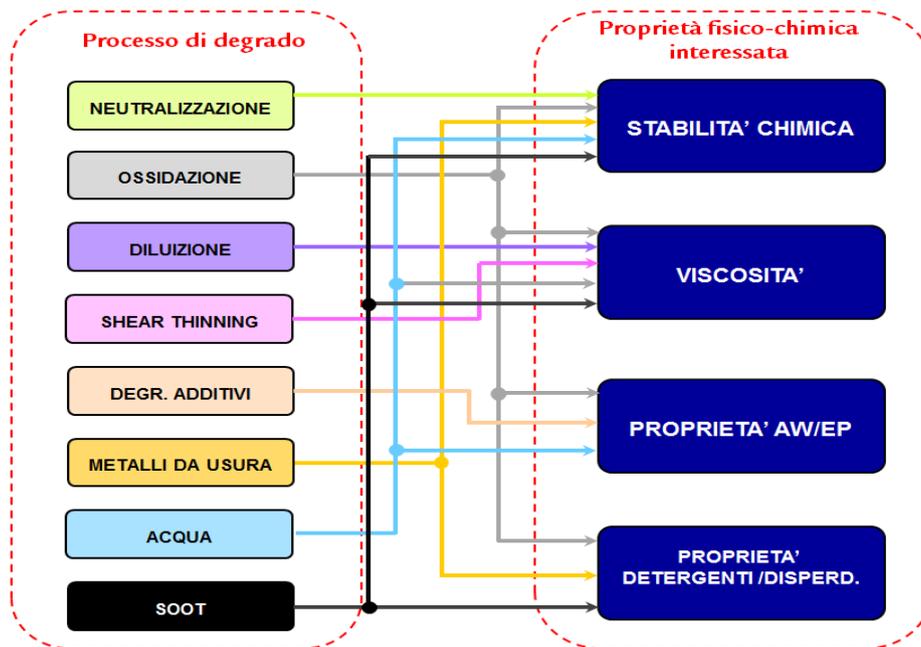


Figura. 3.1) in figura vengono riportate le relazioni tra parametri e proprietà fisico-chimiche dell'olio;

Entriamo ora più nello specifico analizzando i parametri d'invecchiamento singolarmente.

## Neutralizzazione

l'olio presenta una composizione basica, generalmente creata con la dispersione di Solfonato di calcio, che permette di assorbire gli acidi che si formano nel motore a causa della combustione.

La neutralizzazione non è altro che l'usura nel tempo della riserva basica del fluido.

La maggior parte degli acidi che possono venire a contatto con l'olio si formano a causa della presenza di zolfo nel combustibile e dei prodotti solforosi legati alla combustione. Questi a contatto con vapore d'acqua generano acido solforico.

Oltre ai prodotti solforosi la combustione genera  $\text{NO}_x$ , che crea acido nitrico, e prodotti ossidati responsabili della presenza di acido Carbossilico.

Questa contaminazione, riconducibile al blow-by che viene a contatto con l'olio, causa il degrado della riserva basica.

Si genera così un'instabilità chimica che può arrivare, in casi estremi, al funzionamento in ambiente acido degli organi interni al motore.

## Ossidazione

Il fenomeno dell'ossidazione è legato al contatto, ad alta temperatura, degli idrocarburi (base del lubrificante) con l'ossigeno. Tale processo si può suddividere in tre macro-fasi (Fig. 3.2):

- 1) Nella prima fase di questo processo si ha la sottrazione d'idrogeno, presente negli idrocarburi, da parte dell'ossigeno e la conseguente formazione d'idroperossido radicale ( $\text{HOO}^*$ ) e radicali liberi molto reattivi.

In questa fase, la presenza di metalli d'usura dispersi, funge da catalizzatore.

- 2) Questi radicali liberi a loro volta, si combinano con l'ossigeno creando perossidi e idroperossidi.

I perossidi alimenteranno di nuovo questa reazione a catena mentre gli idroperossidi prenderanno parte alla terza fase.

- 3) Nella terza e ultima fase gli idroperossidi in combinazione con l'ossigeno creano composti ossigenati quali Aldeidi, Chetoni, Esteri e acqua.

Giungiamo così alla comparsa, per via delle reazioni di questi ultimi composti tra di loro, di acido Carbossilico e prodotti con peso specifico elevato e superiore a quello della base.

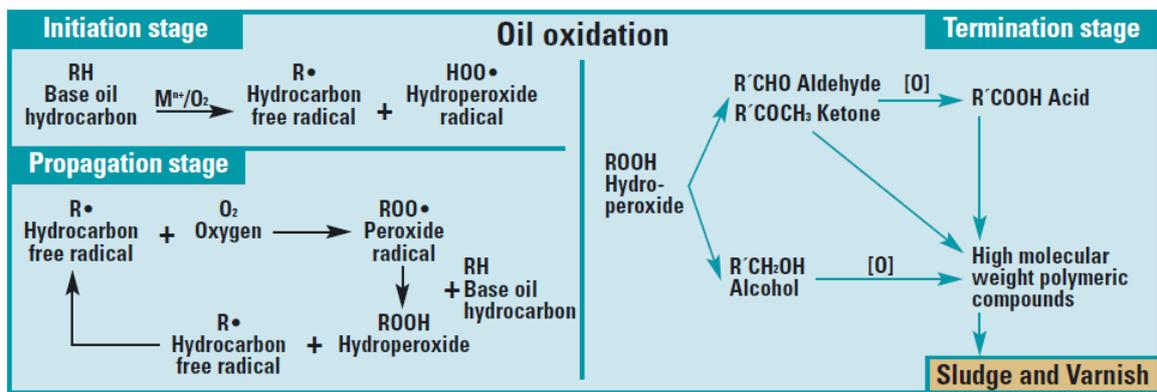


Figura. 3.2 processo chimico di ossidazione;

La principale conseguenza della presenza di acido, come già detto, è l'abbassamento della riserva basica dell'olio, mentre, la formazione di composti con peso specifico elevato genera:

- Aumento di viscosità;
- Lacche e fanghi nella coppa dell'olio per via della loro progressiva polimerizzazione;

L'ossidazione è fortemente influenzata dalla temperatura e da quanta aria e olio si miscela.

Come regola empirica, sopra ai 60 °C, la velocità di ossidazione raddoppia per ogni 10°C di incremento di T olio.

Sotto questa temperatura, il processo di degrado è talmente lento da essere ritenuto trascurabile.

## Soot

Il soot rappresenta l'inclusione nell'olio di residui carboniosi derivanti dalla combustione; fenomeno prevalente nei propulsori Diesel, rispetto ai motori benzina.

Le principali problematiche che nascono dalla presenza di soot in dispersione nell'olio sono legate all'aumento di viscosità. Le particelle tendono, infatti, ad agglomerarsi creando composti sempre più grandi.

Questi influenzano non solo la viscosità, ma tendono anche ad aderire alle superfici creando lacche e fanghi sugli elementi interni; inoltre la loro presenza può essere causa dell'intasamento del filtro olio.

La presenza di soot in dispersione nel lubrificante è causa d'instabilità chimica, infatti, in presenza di ossigeno si ha la creazione di acidi che concorrono alla neutralizzazione.

## Acqua

L'acqua può essere presente negli oli principalmente in tre forme:

- **Disciolta:** la presenza di piccole molecole d'acqua nell'olio è naturale; essa tende, però, a creare legami con gli additivi e i composti residui dell'ossidazione.  
A livello fisico ciò non crea problematiche, mentre a livello chimico può incidere sulla protezione alla corrosione.
- **Emulsionata:** Una volta che le molecole d'acqua all'interno del fluido si sono combinate con tutti gli elementi in grado di offrire legami disponibili, si raggiunge la saturazione. L'acqua in eccesso rimane in emulsione, in altre parole resta separata, in minuscole gocce all'interno dell'olio.
- **Separata:** se l'acqua continua ad aumentare, le gocce in emulsione diventano sufficientemente grosse da precipitare provocando separazione tra le due fasi.

La presenza all'interno del lubrificante di additivi con caratteristica polare aumenta la solubilità dell'olio che di norma si presenta apolare.

Un ulteriore fattore che aumenta la solubilità è la presenza di composti d'ossidazione in grado di creare legami stabili con l'acqua.

Il legame che l'acqua è in grado di creare con gli additivi non solo riduce le potenzialità di quest'ultimi ma, soprattutto se si tratta di additivi solforosi o antiossidanti fenolici, crea sottoprodotti acidi.

Questi acidi possono causare l'usura corrosiva, in particolare nelle componenti contenenti metalli teneri.

L'ossidazione (soprattutto se in presenza di acqua e metalli catalitici come piombo, rame e stagno che ne esaltano il processo) interviene nell'invecchiamento dell'olio in due modi differenti:

- aumentando i legami disponibili per disciogliere acqua con conseguente effetto sulla viscosità che aumenta.
- Creando lacche e fanghi che precipitano in coppa, dovuti all'agglomeramento di residui ossidati.

In figura 3.3 è riportata la percentuale di vita residua dell'olio in funzione della percentuale di acqua all'interno. Si osserva come, con piccole quantità di acqua in soluzione, le prestazioni del fluido e di conseguenza la sua vita residua vengano a calare drasticamente.

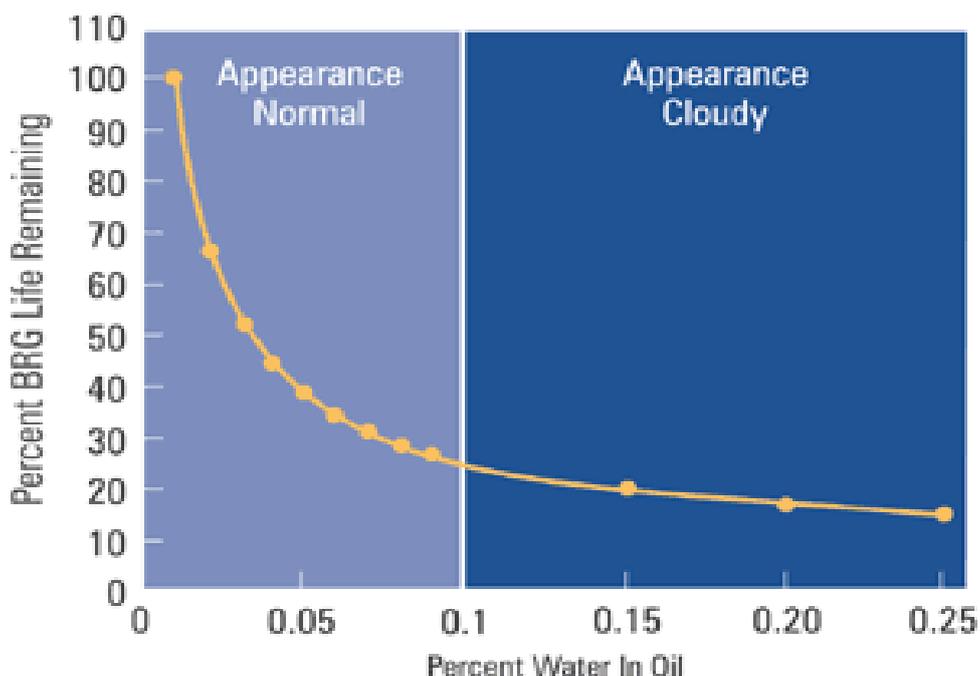


Figura. 3.3) andamento vita residua dell'olio in funzione della percentuale di acqua;

## Degrado Additivi

La presenza di additivi nell'olio si rende necessaria per migliorare le sue caratteristiche sotto vari aspetti. La percentuale degli additivi dispersi nel lubrificante è solitamente in funzione del tipo d'impegno che dovrà svolgere.

In figura 3.4 sono riportate le percentuali per un olio d'impiego automobilistico e le principali caratteristiche degli additivi.

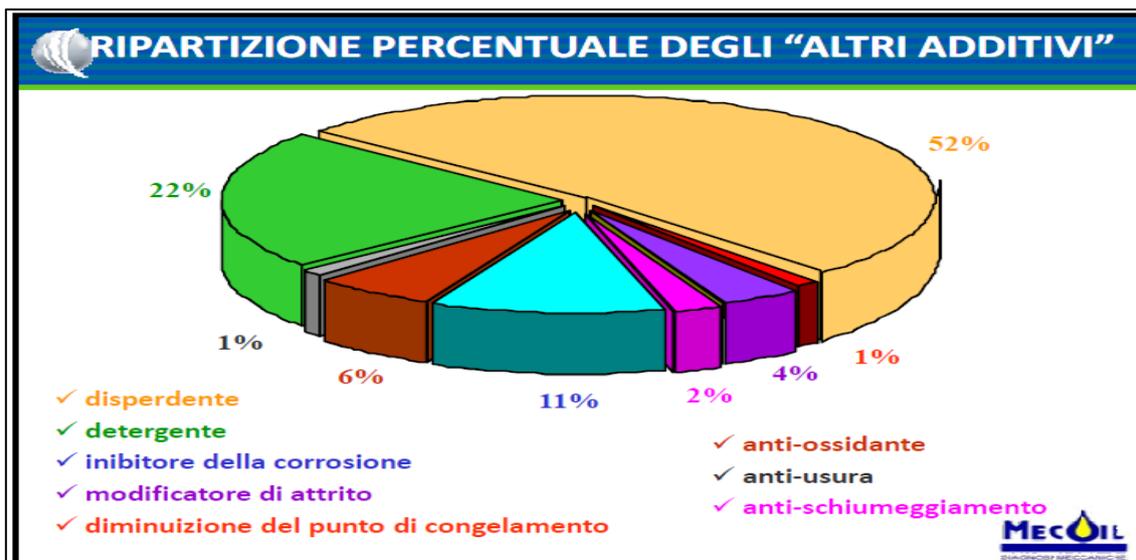
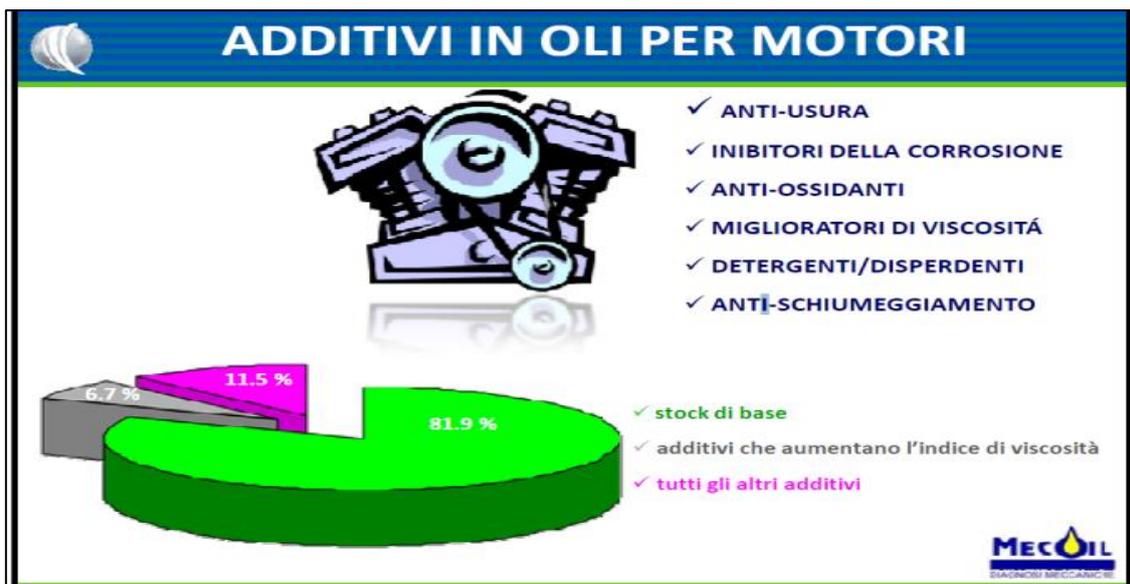


Figura 3.4) ripartizione percentuale additivi;

Il degrado è quindi il naturale decadimento di questi “schermi “ legato al funzionamento. Questo fenomeno, talvolta, è esaltato dalla presenza di metalli nel fluido che inibiscono le caratteristiche degli additivi.

Durante il funzionamento del motore gli additivi si legano in maniera permanente agli inquinanti che entrano a contatto con il lubrificante. Per questo motivo si ha una correlazione diretta tra calo delle prestazioni e tempo di utilizzo dell’olio.

## Diluizione

Il fenomeno della diluizione da combustibile nel fluido lubrificante viene spesso indentificato anche con il nome d'inquinamento.

Il risultato è un degrado delle proprietà fisico-chimiche con conseguente perdita di potere lubrificante del fluido.

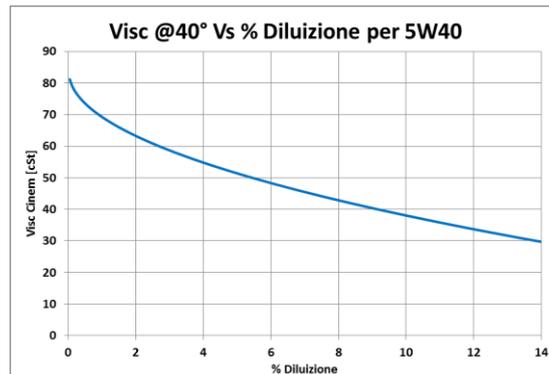


Figura. 3.5) andamento della diluizione in funzione della viscosità;

Gli effetti che la diluizione ha sul lubrificante sono molteplici ma, il principale è sicuramente la variazione della viscosità.

Il combustibile in soluzione nel lubrificante è in grado anche di diminuire la resistenza agli stress termici e abbassare il flash point.

L'unico fenomeno al quale possiamo legare direttamente la diluizione è il trafilamento di combustibile tra le fasce del pistone.

Le cause di questo scambio tra cilindro e carter sono molteplici, l'utilizzo prolungato della vettura a "freddo" incide molto sulla diluizione.

E', infatti, in queste condizioni che il motore non raggiungendo le temperature di funzionamento ottimali accumula combustibile in soluzione nell'olio non riuscendo ad eliminarlo per evaporazione.

## **Shear Thinning**

Lo shear thinning, processo di usura meccanica dell'olio, comporta la rottura delle catene polimeriche presenti all'interno del lubrificante riducendone drasticamente la viscosità.

Solitamente gli oli vengono additivati con composti allo scopo di aumentarne l'indice di viscosità.

Sono proprio questi additivi a subire maggiormente gli effetti meccanici. Pertanto oli ad alto valore di viscosità presentano una sensibilità maggiore a questo fenomeno.

Gli effetti di shear thinning si manifestano soprattutto in fase di avviamento del motore, ove il lubrificante si trova a essere impiegato in condizioni di bassa temperatura e maggior viscosità che ne aumenta lo stress meccanico.

## **Metalli da usura**

I metalli sono presenti all'interno del lubrificante per via del contatto e dell'usura, durante il funzionamento degli organi meccanici.

La principale conseguenza che ha la presenza di questi metalli nell'olio è la riduzione del potere lubrificante dell'olio.

Con l'aumento della concentrazione di metalli essi si sostituiscono all'olio nei meati, non garantendo più l'adeguata lubrificazione degli elementi in movimento.

Se la dimensione delle particelle che si possono trovare in dispersione nell'olio eguaglia quella dei meati tra gli elementi, s'incorre in un processo di usura abrasiva. Questa condizione però si verifica solo in presenza di anomalie importanti.

La presenza di metalli d'usura nell'olio è causa anche dello stripping degli additivi altro fenomeno che incide sul potere lubrificante del fluido.

Alcuni additivi hanno la funzione di legarsi alle superfici di contatto per garantire il mantenimento di un film protettivo sugli elementi. Se nell'olio sono presenti molte particelle metalliche in dispersione avremo l'adesione di questi additivi alle particelle e non più alle superfici di contatto da proteggere inibendo l'effetto lubrificante.

Infine, come già citato nella descrizione dell'ossidazione, i metalli in dispersione fungono da catalizzatori per le reazioni ossidative.

Un'analisi dei metalli d'usura nel lubrificante è in grado di fornire molte informazioni sullo stato di salute effettivo del motore. Il rilascio di determinati metalli è facilmente riconducibile a elementi specifici.

I principali metalli analizzati in Ferrari sono:

- Ferro: presente nelle canne, nell'albero motore bielle, alberi di distribuzione;
- Cromo: derivante dall'usura di componenti legati, in relazione stretta con la presenza di Fe;
- Argento: derivante dalle bronzine speciali.
- Alluminio: derivante dalle fusioni di basamento, sotto-basamento e teste;
- Rame: derivante dalle bronzine.
- Nickel: derivante dalla lega che compone le canne dei cilindri.

Da quanto analizzato finora si riscontra che vi è una connessione tra i fattori che portano al degrado dell'olio.

Questo comporta, di conseguenza, una difficile comprensione di ciò che effettivamente accade alle proprietà dell'olio ed esclude che a degradare una singola proprietà sia un solo parametro.

In figura 1.6 è riportato un grafico con le relazioni che persistono tra i principali parametri.

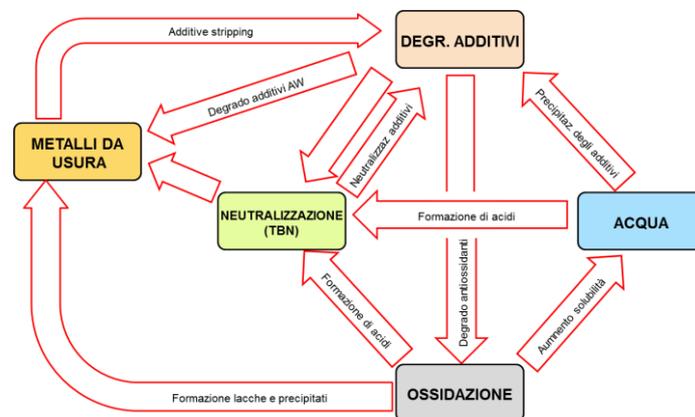


Fig.3.6) relazioni tra parametri di degrado;

### **3.2) metodi e strumenti di misura per l'analisi olio**

Le metodologie per eseguire le misure dei parametri legati all'invecchiamento, sono ampiamente normate.

Di seguito riportiamo le normative vigenti e un piccolo riassunto dei principali strumenti di misura in commercio per l'analisi olio.

#### **Analisi per titolazione TBN (total base number)**

L'analisi per titolazione segue la normativa ASTM D2896 e D4739 ovvero la procedura classica di titolazione di laboratorio.

Alla sostanza in esame è aggiunto un acido per neutralizzare la riserva basica, fino a raggiungere un determinato valore di pH.

Così facendo la basicità iniziale sarà proporzionale alla quantità di acido aggiunto.

La basicità è poi espressa come quantità d'idrossido di potassio (mg KOH/g) che genererebbe quella basicità.

- ASTM D2896: Viene impiegata soprattutto per definire la basicità di oli nuovi, per via dell'impiego di acido perclorico  $\text{HClO}_4$  molto aggressivo che interviene neutralizzando anche le basi deboli che non intervengono nella protezione anti-corrosiva dell'olio.
  
- ASTM D4739: Viene maggiormente impiegata per la definizione del TBN per oli usati. In questa prova è impiegato acido clorico  $\text{HCl}$  che risulta essere un acido meno "forte" del  $\text{HClO}_4$  e non neutralizza tutte le basi ma, solo le basi forti. Per via di questa differenza spesso è considerato più rappresentativo della quantità di basicità residua nell'olio.

#### **Analisi per titolazione TAN ( total acid number )**

L'analisi per titolazione total acid number o TAN (ASTM D664), permette di determinare la componente acida nel campione in misura.

Si procede in maniera analoga all'analisi di titolazione TBN ma, in questo caso, al composto di partenza vengono aggiunti Toluene e Propano, e successivamente misurata la quantità di idrossido di potassio KOH/g che neutralizza la miscela.

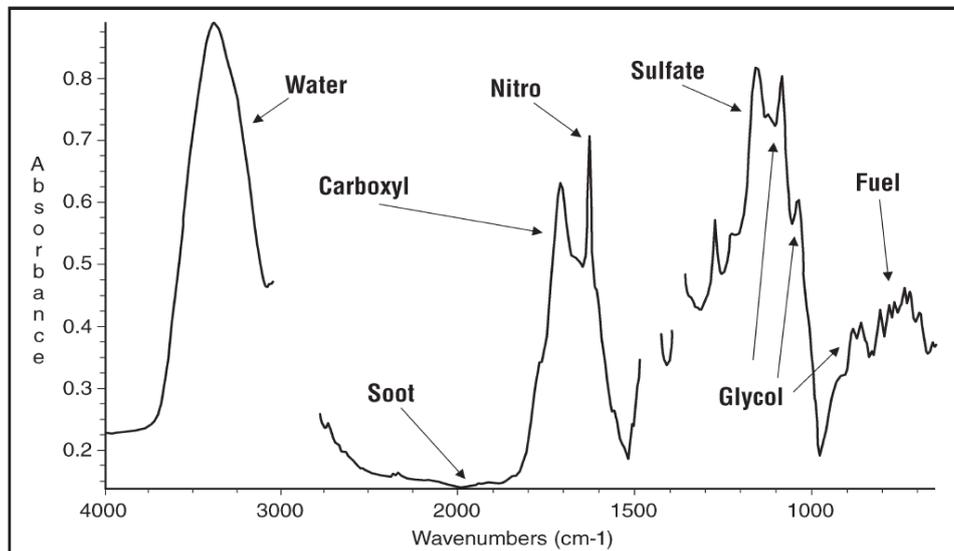
### **Analisi mediante sistema d'indagine FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)**

La tecnica d'indagine FT-IR si basa sull'impiego di un sistema a interferometro Michelson, che tramite l'adozione di specchi è in grado di generare una radiazione infrarossa a una determinata lunghezza d'onda.

La radiazione attraversa il campione e viene raccolta dal rilevatore.

Il sistema registra lo spettro di assorbanza del campione in una condizione di riferimento, nel nostro caso olio nuovo, e nelle misure successive confronta l'assorbimento rilevato con quello di riferimento su tutto lo spettro.

La variazione delle proprietà di base del fluido genera una variazione di assorbanza ad una lunghezza d'onda ben precisa come mostrato in figura 3.7.



*Figura 3.7) spettro assorbanza;*

Con l'analisi FT-IR è possibile analizzare vari parametri fondamentali nel degrado dell'olio tra cui:

- TBN;
- Ossidazione;
- Contaminazione da acqua;
- Contaminazione da glicole;
- Diluizione;
- Contenuto di particolato;
- Contenuti di solfati e di nitrati;
- Degrado degli additivi;

Nell'impiego di questo strumento non è da sottovalutare la presenza di acqua nel campione, essa interferisce con l'assorbanza se presente in quantità molto elevata, allargando lo spettro misurato e falsando i risultati.

I risultati sono espressi in termini di assorbanza a una determinata lunghezza d'onda [Abs/0.1 mm] come nel caso dell'ossidazione, mentre per il TBN lo spostamento del picco viene legato ad una mutazione di alcalinità. Nota la relazione che intercorre tra queste due grandezze, i risultati sono espressi in mg KOH/g in accordo con il metodo per titolazione.

## **Analisi IR**

Il costo e la delicatezza dell'interferometro lo rendono poco adatto a un'analisi veloce di un campione olio come spesso necessita l'ambito automotive, pertanto i sistemi Infrarossi che funzionano in maniera molto simile al sistema FT-IR rappresentano un giusto compromesso.

Questi strumenti utilizzano una radiazione infrarossa che attraversa il campione olio posto tra due lenti.

Il sistema è dotato di filtri passa banda che restringe il campo d'esame solo a quello delle lunghezze d'onda interessate e, come nel caso precedente, confronta i risultati ottenuti con valori di riferimento prima allocati in memoria.

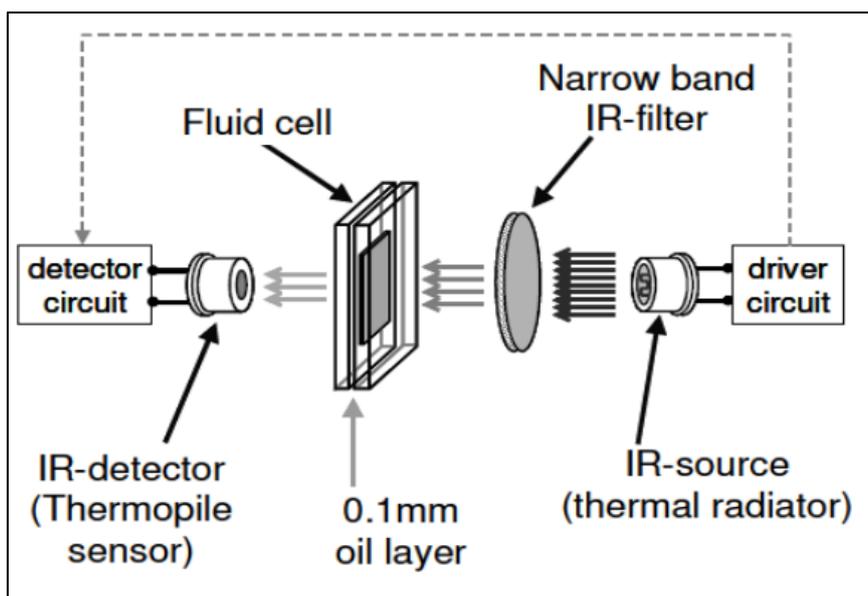


Figura 3.8) struttura sistema infrarosso;

## Analisi della viscosità

Per la misura della viscosità e dell'indice di viscosità (viscosity index) si fa riferimento alla ASTM D2270.

La variazione di viscosità, è uno dei parametri più complessi da analizzare per via del fatto che vi concorrono molti contributi talvolta contrastanti.

Solitamente si apprezza un aumento di viscosità correlato all'ossidazione, alla presenza di soot nel lubrificante o alla contaminazione da acqua.

Questa relazione crescente però non è sempre rispettata.

L'effetto dello shear thinning o l'effetto della diluizione può intervenire bilanciando questo aumento di viscosità atteso legato all'ossidazione. Ci si può pertanto trovare in condizioni di riferimento per quanto riguarda la viscosità ma, a elevati valori di ossidazione.

La maggior parte dei sistemi che rilevano la viscosità si basano sul metodo impiegato dal viscosimetro Stabinger.

Lo strumento si compone di due rotori, uno esterno riscaldato ad una temperatura di riferimento che ruoterà con velocità pari a  $n_2$  e uno flottante interno.

Il rotore interno, dotato di un magnete, ruoterà a velocità  $n_1$ .

Tra il rotore esterno e il rotore flottante viene interposto il fluido in esame.

In queste condizioni sul rotore flottante si generano due coppie contrapposte, una legata al trascinamento ad opera dell'lubrificante per via della rotazione del rotore esterno, con intensità proporzionale a  $(n_2 - n_1)$ .

Mentre la seconda coppia, di tipo frenate, sarà generata dalla corrente parassita e sarà proporzionale ad  $n_1$ .

Nota ora la conformazione del meato possiamo, conoscendo la velocità  $n_1$  del rotore e la temperatura a cui si trova, risalire alla viscosità dinamica del fluido.

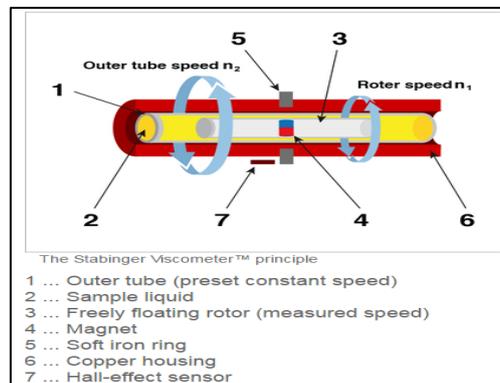


Figura 3.9) sistema Stabinger;

### **3.3) Degrado olio per Ferrari**

Al fine di individuare i parametri più importanti per il degrado del lubrificante, sui quali concentrare l'attenzione (che hanno influenzato anche la scelta degli strumenti di misura), è stata fatta un'analisi su campioni olio, sia di vettura che di banco, reputati a fine vita.

Sono state così individuate le principali caratteristiche chimiche del lubrificante che tendono a degradare più repentinamente, da tenere monitorate.

Queste sono:

- **Ossidazione;**
  
- **Neutralizzazione;**

Per garantire il mantenimento delle caratteristiche fisiche del fluido, è stato invece scelto di analizzare:

- **La viscosità**

Si ottiene così una stima delle condizioni fisico-chimiche dettagliata dell'olio durante il funzionamento.

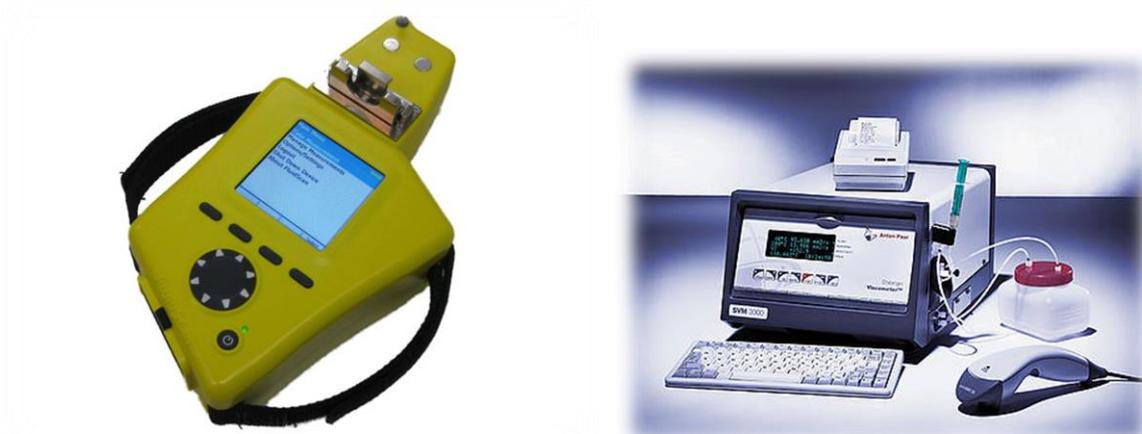
### **3.4) Strumenti di misura adottati da Ferrari**

Per l'analisi chimica dei campioni olio, è stato scelto un sistema di indagine ad infrarosso, fluid-scan, molto versatile e di semplice utilizzo.

Il prodotto, offerto da Mecoil, permette lo studio, come citato, di molteplici parametri e caratteristiche del lubrificante tramite lo spettro di assorbanza.

Tra i risultati di output dello strumento possiamo evidenziare:

- Ossidazione espressa in [Abs/0,1 mm];
- TBN espressa in [KHO/g];



b)

*Figura 3.10) a) fluid-scan e b) viscosimetro Anton-Paar;*

Il terzo parametro, la viscosità, è analizzata in azienda con l'impiego del viscosimetro Anton-Paar. Questo strumento si basa, anch'esso, sulla tecnica impiegata nel metodo Stabinger.

Possiamo ricavare dall'analisi:

- Densità (g/cm<sup>3</sup>);
- Viscosità cinematica (cSt)
- Viscosità dinamica ( mPa·s)

Analisi di viscosità è eseguita alla temperatura di 40°. Entrambi gli strumenti presentano un'elevata ripetibilità.

### **3.5) Scelta dei limiti per definire l'olio esausto**

La scelta di limiti sui parametri di degrado si rende necessaria per interpretare correttamente i risultati delle analisi.

#### **Limiti per ossidazione.**

L'ossidazione è un parametro con caratteristica monotona crescente in relazione diretta con il funzionamento del motore.

I limiti scelti da Ferrari su questo parametro hanno origini statistiche, derivano infatti dall'analisi di svariati campioni.

La scelta di affidarsi alla statistica si è rivelata l'unica strada percorribile in quanto, i valori limite di ossidazione non esistono in letteratura e dipendono dal tipo d'impiego e dal tipo di lubrificante.

### Limiti per neutralizzazione

La variazione di riserva basica, a differenza dell'ossidazione, avrà caratteristica decrescente. La continua interazione con derivati di combustione e acidi, tende a consumare la riserva del lubrificante.

I limiti su questo parametro risultano essere più stringenti per i motori Diesel, nei quali al dimezzamento del valore iniziale della riserva basica, si può parlare di olio esausto.

Per i motori a benzina, grazie al combustibile più raffinato e quasi privo di composti solforosi, il processo di neutralizzazione è meno repentino.

Si sceglie di porre il limite inferiore alla neutralizzazione dell'olio all'eguagliarsi dei valori di TBN e TAN.

Il motivo che porta a compiere questa scelta è giustificato dal repentino aumento di TAN osservato al superamento di tale soglia, con rischio di funzionamento in ambiente acido.

In figura 3.11, riportiamo l'andamento di TBN e TAN, dove è possibile osservare la caratteristica appena descritta.

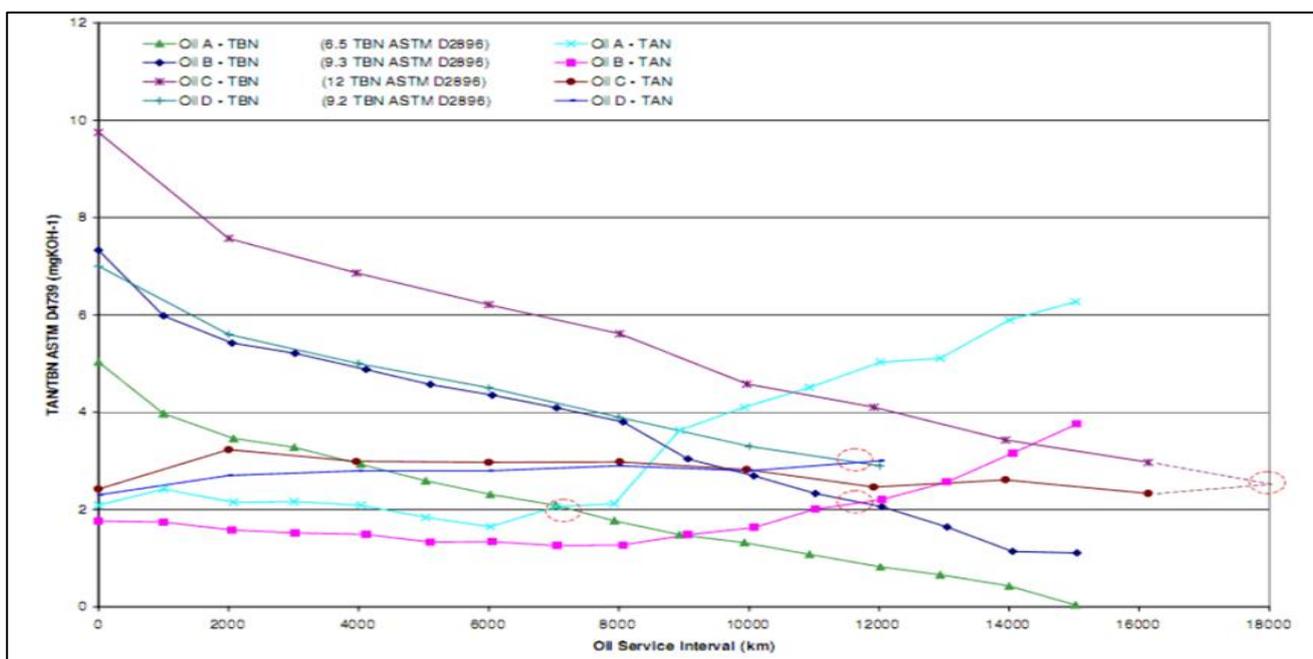


Figura 3.11 ) andamento di TAN e TBN in funzione dei Km percorsi;

## Limiti di viscosità

La variazione di viscosità ha andamenti piuttosto altalenati, ma con caratteristica mediamente decrescente.

Come già descritto all'inizio di questo capitolo, la presenza nel lubrificante di composti derivanti dall'ossidazione e dalla combustione (soot), è causa di un aumento di viscosità dell'olio.

L'effetto dovuto alla diluizione da benzina risulta però essere predominante, definendo una caratteristica decrescente ai valori di viscosità in relazione al funzionamento motore.

Data la caratteristica parabolica che lega aumento di diluizione alla perdita di viscosità, (figura 3.12) poniamo il limite tra il 7 e il 9 % di diluizione.

A questo grado d'inquinamento del lubrificante, corrisponde il dimezzamento del valore iniziale di viscosità.

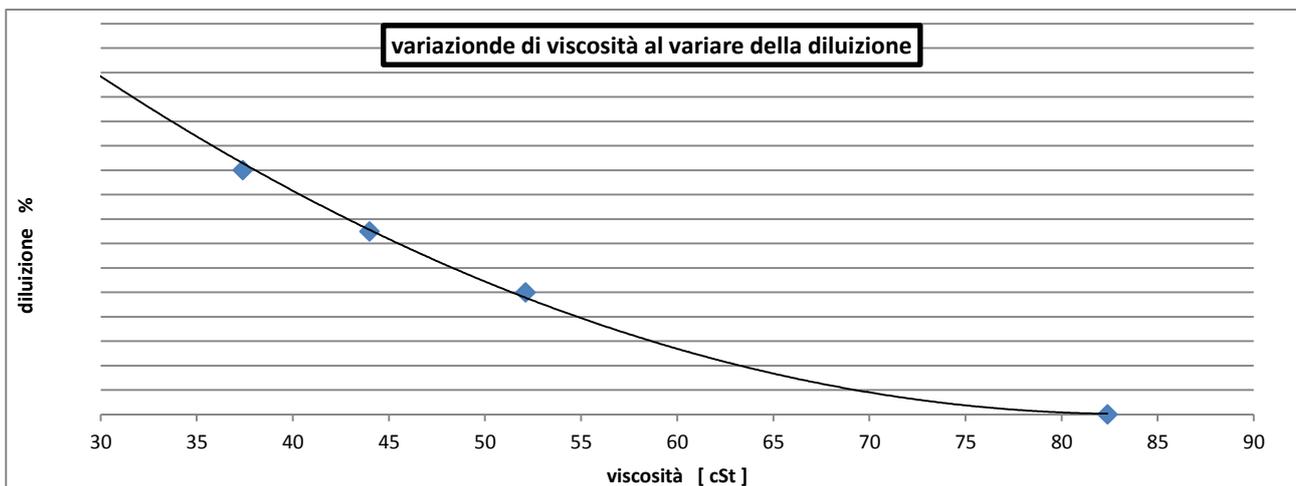


Figura 3.12) andamento della viscosità in funzione della diluizione;

## Capitolo 4

### IDEAZIONE DEL SOFTWARE

Alla base del modello d'invecchiamento olio proposto da Ferrari, vi è la possibilità di legare alcuni parametri motoristici al degrado delle caratteristiche fondamentali.

Nel capitolo tre di questo elaborato sono state presentate le proprietà fisico-chimiche del lubrificante che tendono a degradare in relazione ai parametri che inducono tale degrado. Per lo sviluppo del software sarà necessario collegare le variabili motoristiche ai parametri sopra citati. Si crea in questo modo un percorso, modellabile sperimentalmente, in grado di legare causa ed effetto.

Da aspetti già noti in bibliografia, i parametri motoristici che ricoprono primaria importanza nel processo di degrado olio sono essenzialmente cinque:

- Temperatura olio;
- Temperatura acqua;
- Regime di rotazione;
- Carico;
- Tempo d'iniezione.

In figura 4.1 riportiamo il diagramma di flusso alla base del modello.

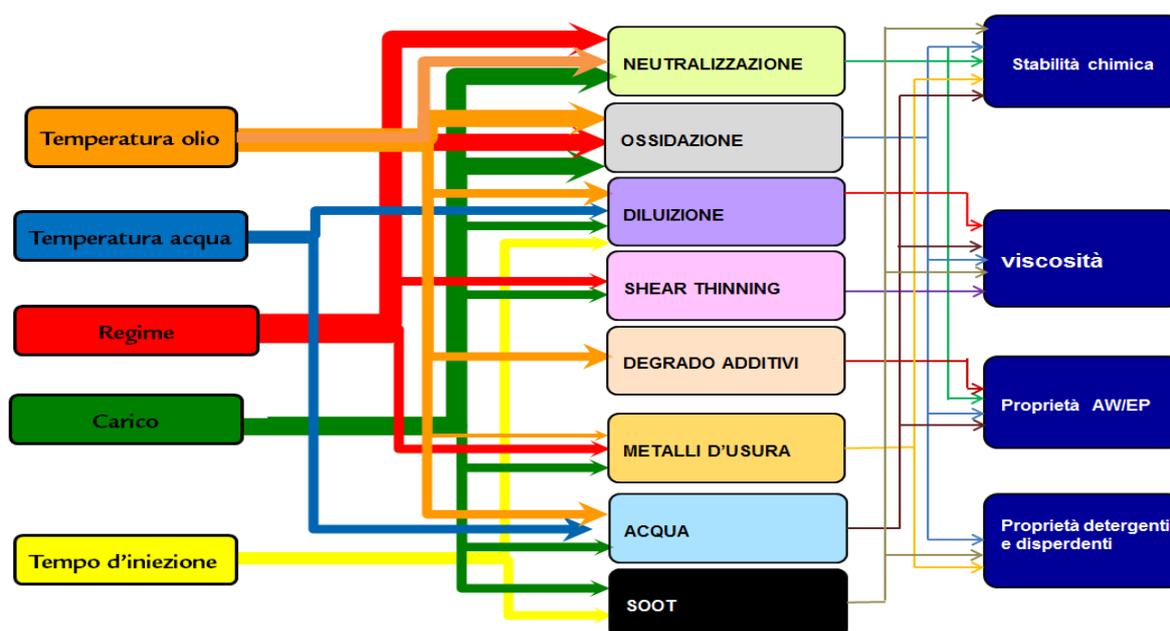


Figura 4.1) catena di causa effetto;

Da questa configurazione di partenza, come già anticipato, ci poniamo l'obiettivo di modellare il processo d'invecchiamento per instabilità chimica, mediante la stima di ossidazione e neutralizzazione.

Semplificando lo schema di figura 4.1 otteniamo il diagramma di figura 4.2.

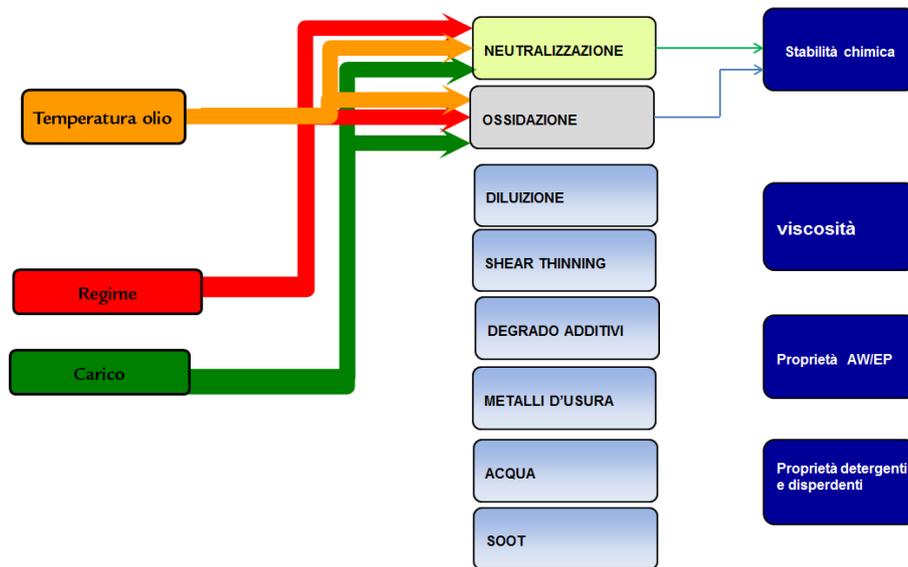


Figura 4.2) modello di stabilità chimica

Per quanto riguarda la variazione di viscosità, in figura 4.3 riportiamo tutti i parametri che concorrono al degrado.

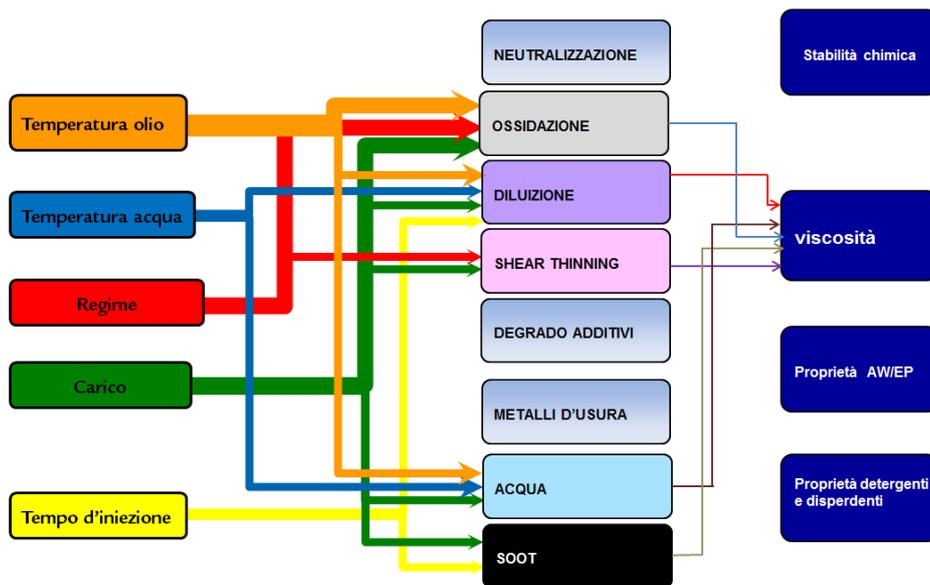


Figura 4.3) relazione tra parametri motoristici e degrado viscosità;

Notiamo dall'immagine la complessità di questo processo e il numero elevato, sia di parametri motoristici sia di parametri di degrado, che vi concorrono. La modellizzazione sarebbe molto complessa.

Per semplificare l'approccio, si è scelto di verificare la variazione di questa proprietà, mediante misure indirette di pressione olio in condizioni stazionarie.

La fisica alla base del modello prevede di definire la variazione di pressione come:

$$\Delta p \approx Q * \mu$$

Dove:

**Q** è la portata;

**μ** è la viscosità del fluido;

Possiamo affermare che normalmente Q è funzione di  $\Omega$ , cioè della velocità angolare, pertanto, il  $\Delta p$  è solitamente legato alla variazione di regime. Infatti, la portata può essere espresso come:

$$Q \approx K * \omega$$

Dove K è un fattore che tiene conto della conformazione dei canali olio all'interno del motore e, sebbene legato ad ogni singolo motore, rappresenta una costante.

Da queste relazioni è facile intuire che in condizioni stazionarie, quindi a parità di  $\Omega$ , è possibile legare una variazione di pressione a una variazione di viscosità.

Per garantire che tale variazione non sia legata ad analisi in condizioni di temperature diverse, nel modello entreranno la temperatura dell'acqua e la temperatura dell'olio. Allo stesso tempo, dovendo assicurare la portata costante, avremo in ingresso anche il regime di rotazione e una stima del gradiente di velocità angolare.

Come detto, la misura, verrà eseguita memorizzando un valore di pressione, motivo per il quale in input avremo anche questo parametro.

Elenchiamo tutti i parametri necessari al nostro software per il suo funzionamento:

- Regime;
- Carico;
- Temperatura olio;
- Temperatura Acqua;
- Pressione olio;

In figura 4.3 è riportato lo schema semplificato dell'intero software.

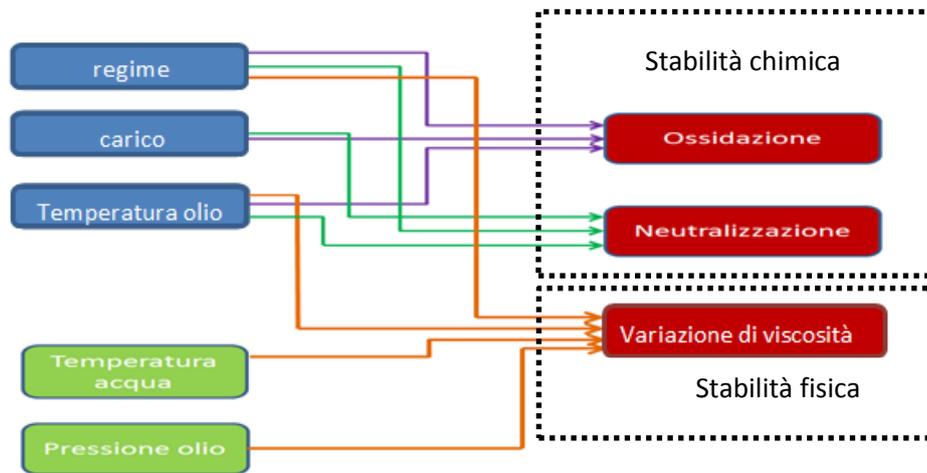


Figura 4.2) diagramma software semplificato.

#### 4.1) Analisi sperimentale al banco prova del degrado olio ed elaborazione dati

Note le variabili sulle quali possiamo intervenire per modificare lo stato di degrado dell'olio, possiamo procedere con il passo successivo, in altre parole, definire la sensibilità tra i parametri in ingresso e i degradi da modellare.

L'attività che ha permesso di ottenere i dati necessari è stata svolta a banco, con lo scopo di definire le interazioni tra i parametri in input e quelli in output.

Il motore scelto per svolgere la fase di acquisizione dati è un F154CB, ossia, un V8 Bi-turbo con V di 90° da 670 CV e valori massimi di coppia di 750 Nm, che equipaggia la Ferrari 488 GTB.

Come illustrato in figura 4.2, ossidazione e neutralizzazione, sono dipendenti dai medesimi parametri, il che permette di acquisire i dati necessari alla modellazione di questi due invecchiamenti da una singola prova specifica.

Per indagare la variazione di viscosità, essendo un parametro di tipo fisico, ci si basa su una misura diretta.

Lo scopo sarà quello di valutare la funzione che lega una variazione di viscosità ad una variazione di pressione olio nel canalone di alimentazione delle bronzine.

## Analisi sperimentale d'indagine ossidazione e neutralizzazione

Il piano di prova, creato per generare i dati necessari allo studio del fenomeno, prevedeva di indurre il degrado del lubrificante a punti fissi stabiliti.

Mantenendo il motore a valori stazionari di 2000 rpm, 150 Nm di coppia e temperatura olio di 100°, per un tempo pari a 100 ore, sono state generate rette d'invecchiamento per ossidazione e neutralizzazione in funzione del tempo (fig. 4.4.)

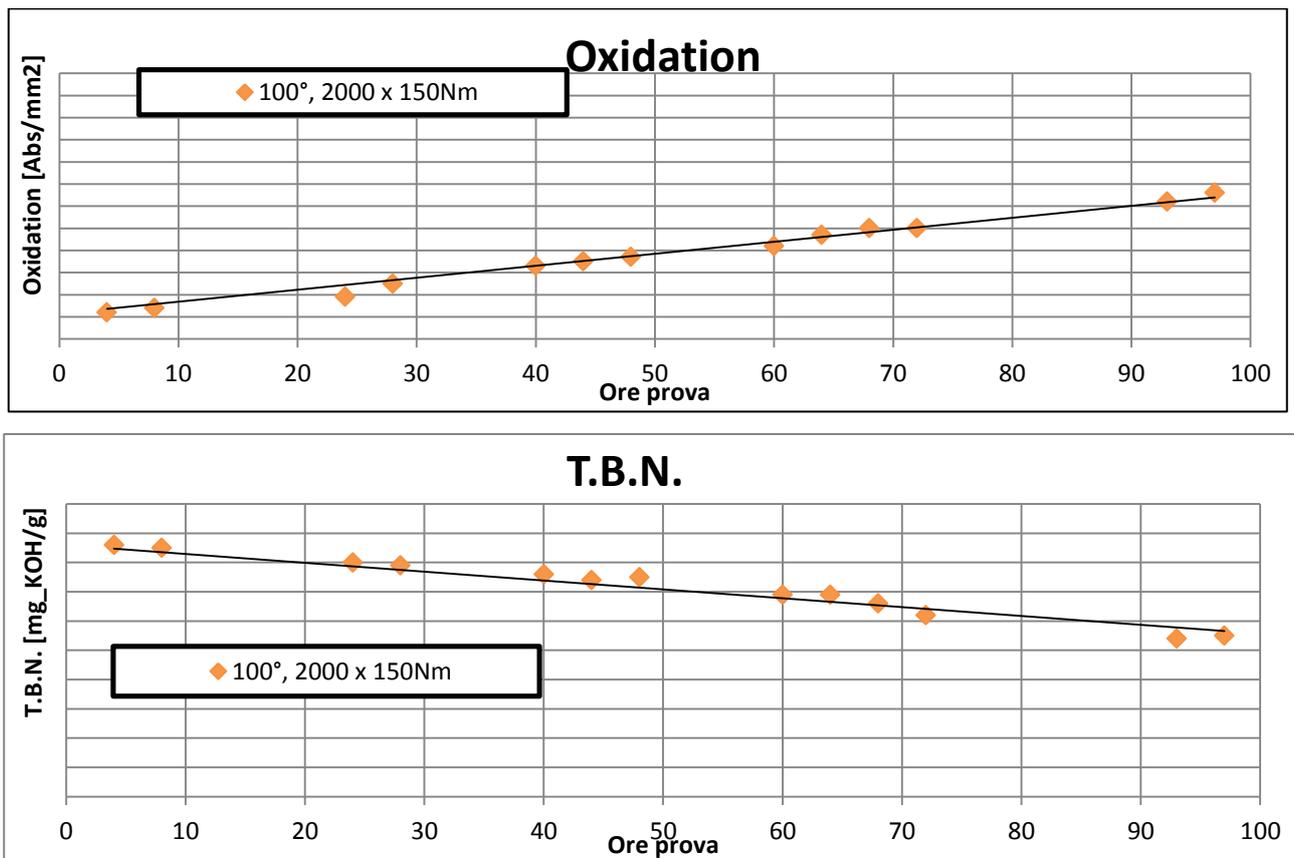


Figura 4.4) retta di degrado per ossidazione e neutralizzazione di riferimento;

Sono state poi ripetute prove con la stessa estensione temporale, variando a rotazione uno dei tre parametri in ingresso.

Ciò che si ottiene, è una variazione del gradiente d'invecchiamento, che leggeremo alla variazione d'input (figura 4.5 a, b, c).

Di seguito riportiamo la tabella di prova che mostra i punti motore scelti per costruire la statistica.

Regime [ rpm ]	Carico [Nm]	T° olio [C°]
2000	150	100
2000	150	120
2000	450	100
6000	450	100
2000	450	130

Tabella 4.1) punti motore in studio

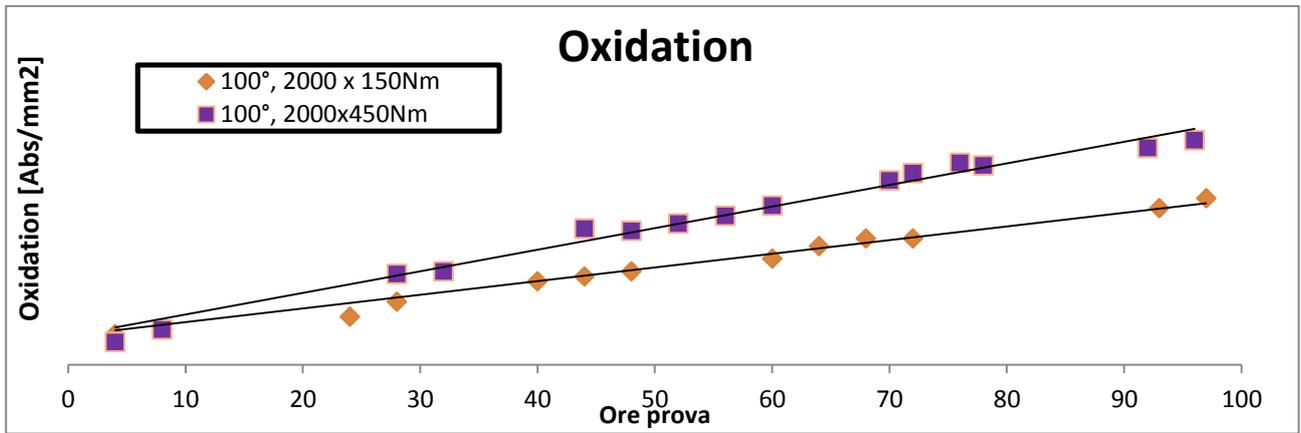


Figura 4.5 a) Ossidazione al variare del carico;

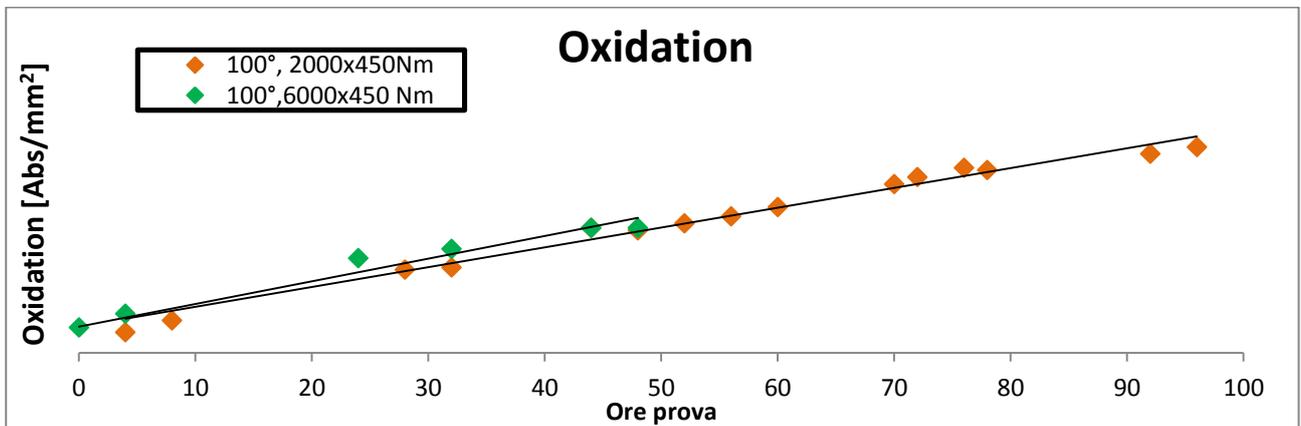


Figura 4.5 b) ossidazione al variare della velocità;

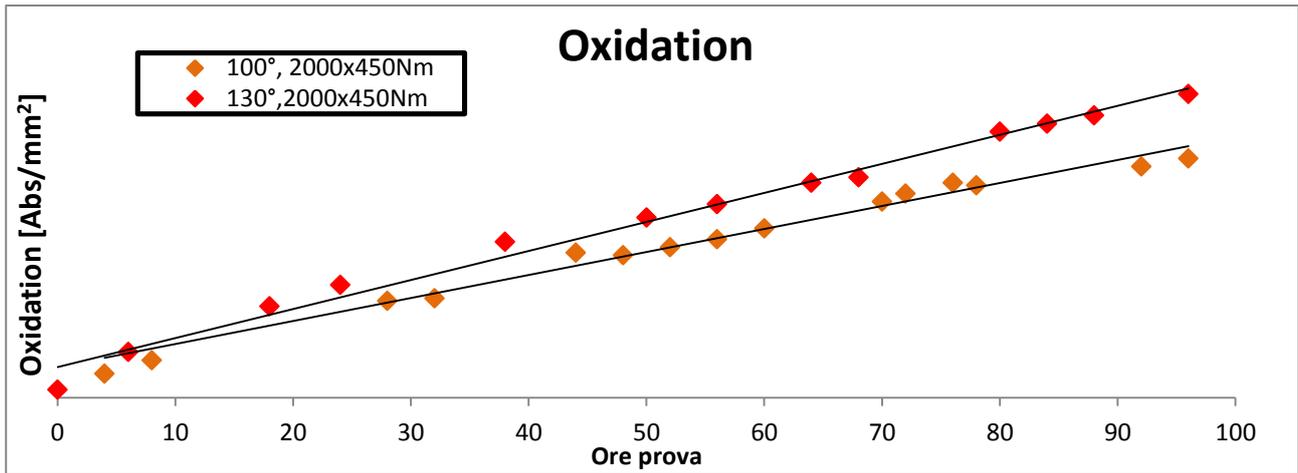


Figura 4.5) Ossidazione al variare della temperatura dell'olio

Per quanto riguarda l'ossidazione, le relazioni che si generano sono tutte di tipo lineare, possiamo così modellare il tasso di ossidazione, in altre parole una funzione in grado di stimare in ogni istante il valore puntuale di questo degrado.

La funzione si presenterà nella forma seguente:

$$\text{Oxid}_{\text{rate}} = C1 * \text{Regime} + C2 * \text{Carico} + C3 * T^{\circ}_{\text{olio}} + C0$$

Dove:

C1 = Costante dipendenza dal regime;

C2 = Costante dipendenza dal carico;

C3 = Costante dipendenza dalla temperatura olio;

C0 = intercetta;

Le costati C0, C1, C2, C3, saranno definite mediante regressione lineare.

L'integrazione nel tempo della funzione  $\text{Oxid}_{\text{rate}}$ , permetterà di conoscere il cumulo di ossidazione legato al tipo di funzionamento motore.

Per quanto riguarda il processo di neutralizzazione l'acquisizione dati si è svolta in maniera del tutto analoga, definendo però relazioni differenti tra  $\text{TBN}_{\text{loos}}$  e i parametri motore.

Dall'analisi dei dati sperimentali, emerge una dipendenza quadratica da regime e coppia e una lineare per quanto riguarda la temperatura; otteniamo:

$$TBN_{100s} = C1 * (\text{regime})^2 + C2 * (\text{Carico})^2 + C3 * T^{\circ}_{\text{olio}} + C0$$

Dove:

C1 = Costante dipendenza dal regime;

C2 = Costante dipendenza dal carico;

C3 = Costante dipendenza dalla temperatura olio;

C0 = intercetta;

Le costanti sempre definite per mezzo dei una regressione lineare.

Gli avviamenti a freddo hanno come conseguenza l'aumento di ppm d'acqua in soluzione nell'olio. Questa inclusione, indesiderata, accelera il processo di neutralizzazione creando acidi con i composti derivanti dalla combustione, che riducono la riserva basica. Il fenomeno si attenua raggiunta la temperatura di funzionamento alla quale si ha l'evaporazione dell'acqua dell'olio.

Per caratterizzare questo effetto, in queste condizioni specifiche di funzionamento, sono state eseguite prove specifiche.

Noti i valori di  $TBN_{100s}$  al minimo alla temperatura di funzionamento, ed eseguendo prove con olio raffreddato (a temperature inferiori a quelle di funzionamento), valutiamo una funzione quadratica, di primo tentativo, che modelli l'andamento dell'invecchiamento per neutralizzazione a basse temperature ( $TBN_{100s \text{ cold}}$ ).

In figura 4.6 e 4.7 riportiamo l'andamento del  $TBN_{100s}$  al variare della temperatura.

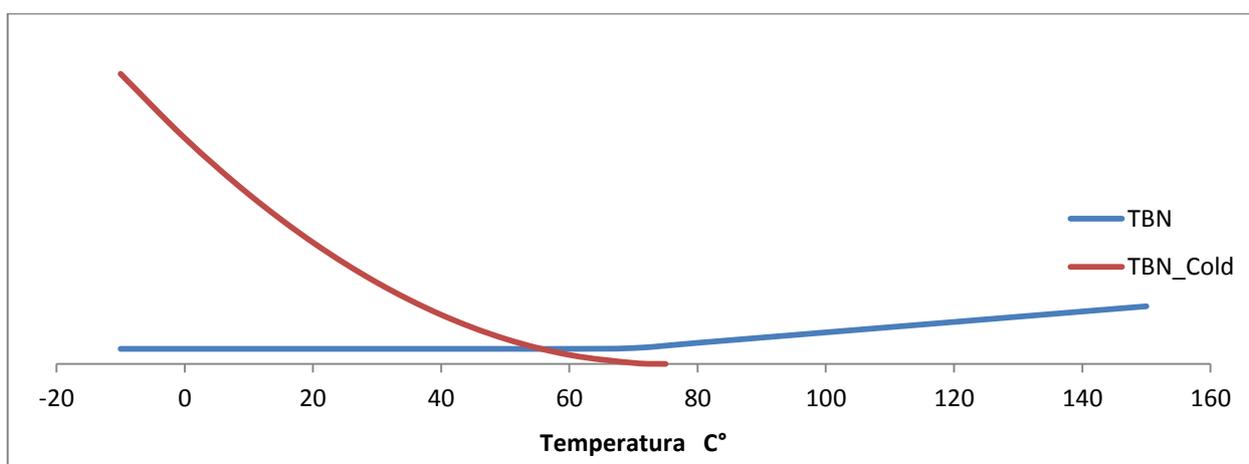


Figura. 4.6) curve che approssimano il decadimento a freddo, in rosso e curva che approssima il decadimento a caldo in blu;

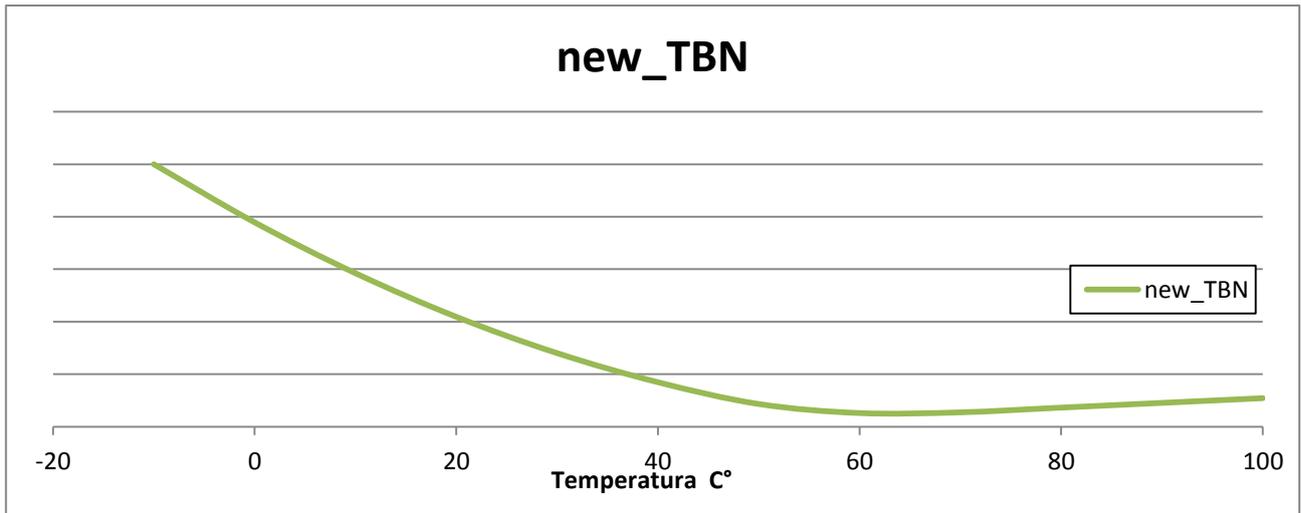


Figura 4.7) nuovo andamento TBNloos in funzione della temperatura;

Dal grafico è possibile notare come l'invecchiamento sia molto più accentuato nella zona di funzionamento a freddo.

Possediamo ora tutte le informazioni necessarie alla stesura di un modello Simulink in grado di riprodurre il processo degrado chimico dell'olio.

## 4.2) Creazione del modello Simulink

Il modello sarà strutturato per ricevere in ingresso i valori di coppia, regime e temperatura olio istante per istante, i quali concorreranno a definire le funzioni di degrado, che saranno integrate per generare il cumulo d'invecchiamento.

Sarà inoltre possibile, noti i limiti accettabili di ossidazione e neutralizzazione, avere una stima effettiva della vita residua percentuale del nostro lubrificante.

### Struttura software ossidazione

La formula di  $Oxid_{rate}$ , prima mostrata, sarà alla base della struttura software di ossidazione.

Sommando il cumulo ottenuto dall'interazione al valore iniziale, noto statisticamente dell'analisi di campioni olio nuovo, saremo in grado di conoscere istante per istante il valore di ossidazione.

Per adattare il modello all'impiego in vettura, sono aggiunti due bit, con lo scopo di simulare cambi olio e rabbocchi.

In figura 4.7 riportiamo uno schema semplificato del modello di ossidazione.

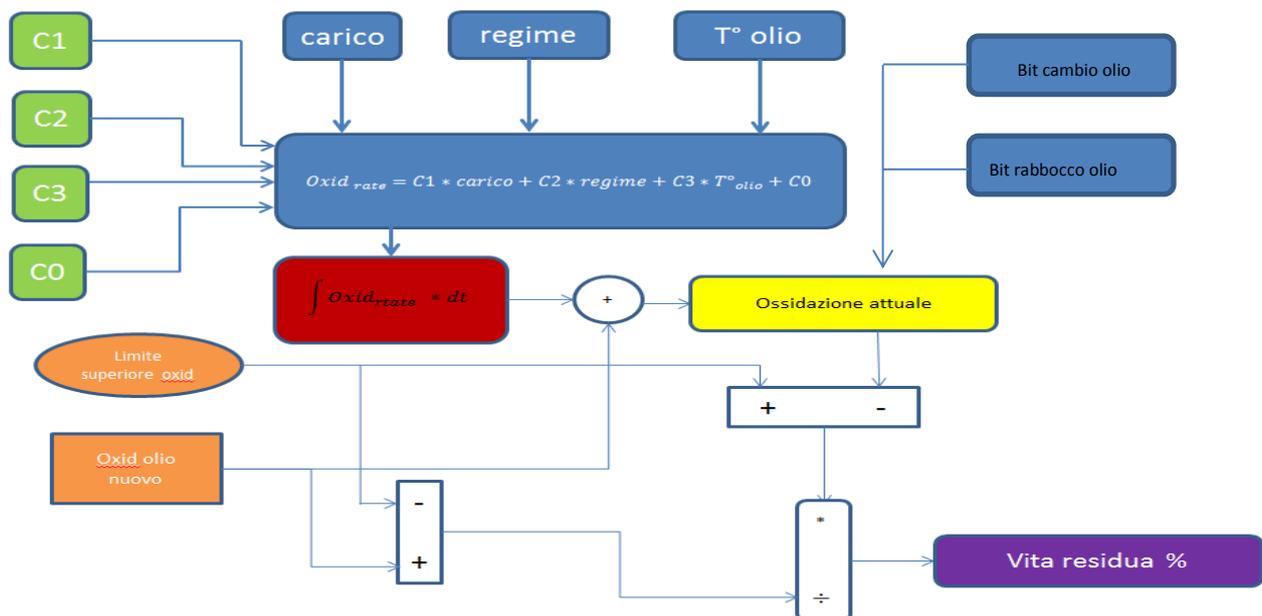


Figura. 4.7) modello software ossidazione;

## Struttura software TBN

In figura 4.8 riportiamo il modello semplificato di neutralizzazione.

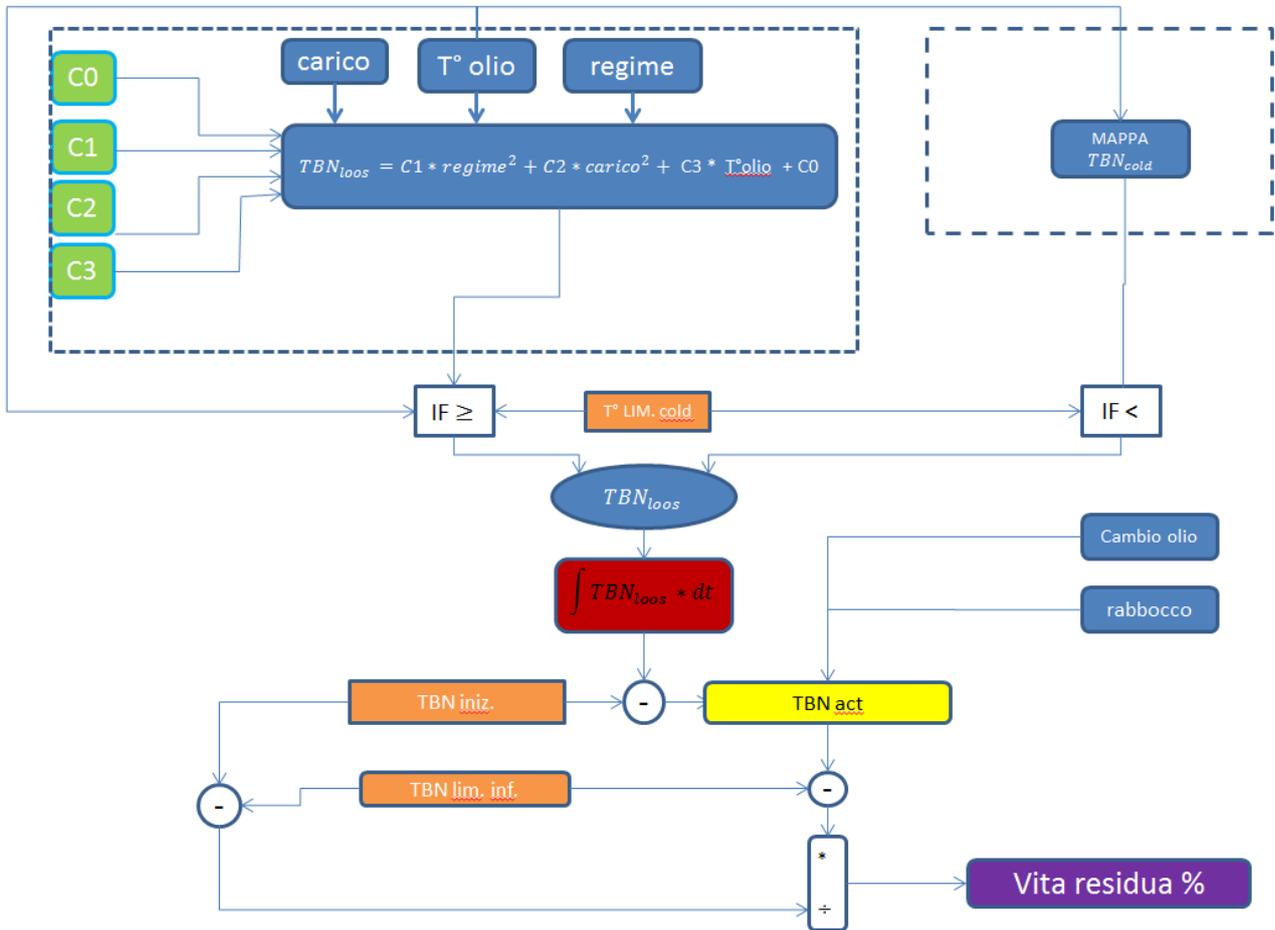


Figura 4.8) modello software TBN;

Com'è possibile vedere il modello stima gli avviamenti a freddo mediante l'impiego di una mappa contenete i valor di  $TBN_{loss\ cold}$ .

Superata la zona di funzionamento a freddo ( $T^{\circ} \text{olio} > T^{\circ} \text{lim. Cold}$ ), il software impiega i dati in ingresso, valutati in funzione del tempo, per calcolare la funzione  $TBN_{loss}$ , che integrata genererà la perdita di riserva basica.

Anche in questo caso, il valore iniziale di basicità dell'olio è stato scelto per mezzo d'indagine statistica e il modello si serve di bit per simulare raddocchi e cambi olio.

## Struttura software valutazione Viscosità

Il compito del modello software, nella stima della variazione di viscosità, è quello di memorizzare un valore di pressione olio da confrontare con un valore di riferimento.

Per eseguire questa misura il motore si deve trovare in condizioni ripetibili, ossia, la temperatura dell'olio e dell'acqua (e di conseguenza dell'intero motore) dovrà essere compresa tra due estremi. Questo per garantire che la variazione di viscosità non sia legata alla caratteristica fisica dell'olio, di modificare questa proprietà in base alla temperatura in cui si trova.

Inoltre, come già affrontato, deve essere garantita una portata costante e uguale durante ogni misura (regime compreso tra due estremi e gradiente limitato).

Il valore di riferimento al quale confrontarci non può essere scelta a priori; il coefficiente K, dipendente dai condotti interni del motore, varia non solo tra famiglie di motori differenti, ma anche tra motori della stessa famiglia per via delle diverse perdite di carico.

Per ovviare a questo problema il modello è stato strutturato in modo da memorizzare il valore di pressione olio al primo avviamento, sfruttandolo in seguito come pressione di riferimento.

Per garantire una misura confrontabile, i vincoli che dovranno essere contemporaneamente soddisfatti, per attivare la lettura del segnale di pressione sono:

- $T^{\circ} \text{ oil min} \leq T^{\circ} \text{ oil} \leq T^{\circ} \text{ oli max}$ ;
- $T^{\circ} \text{ H}_2\text{O min} \leq T^{\circ} \text{ H}_2\text{O} \leq T^{\circ} \text{ H}_2\text{O max}$ ;
- $\text{rpm min} \leq \text{rpm} \leq \text{rpm max}$ ;
- $\text{Gradiente giri} < \text{limite gradiente di giri}$ ;

In figura 4.9 riportiamo lo schema del modello per il calcolo della variazione di viscosità.

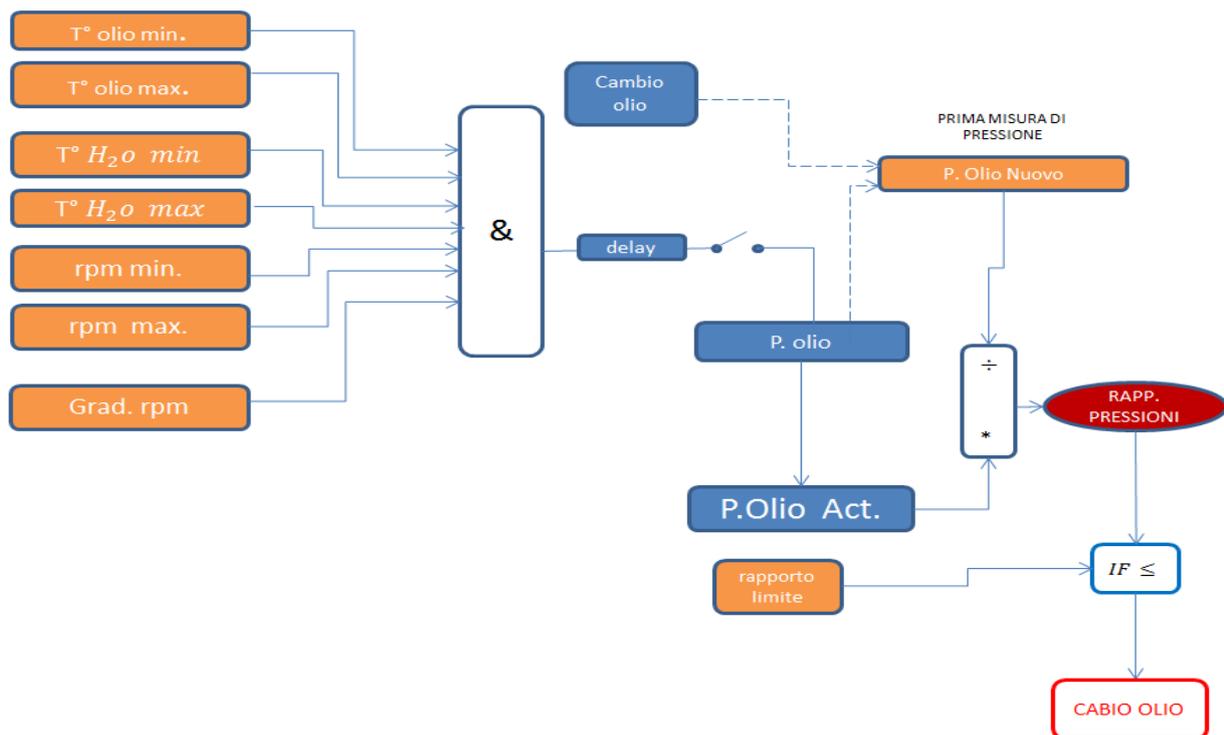


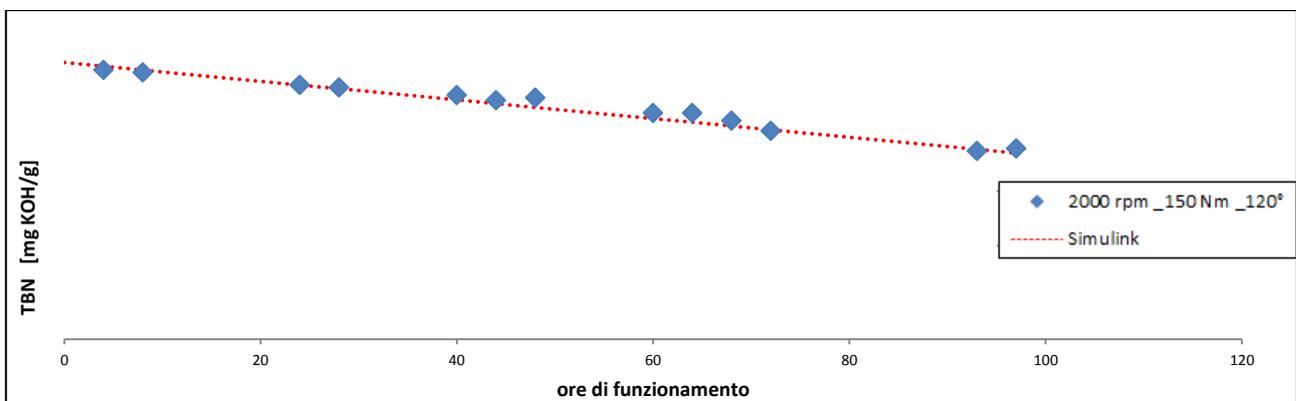
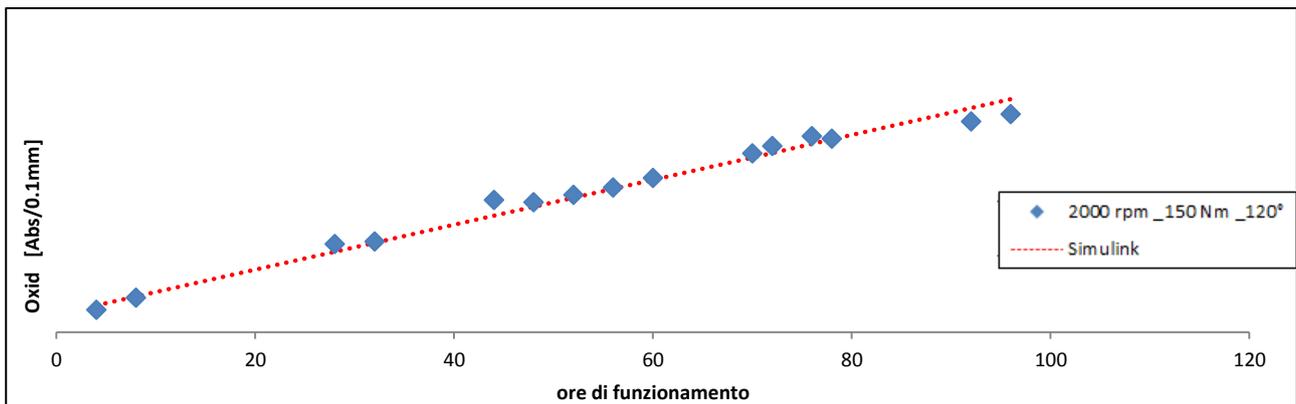
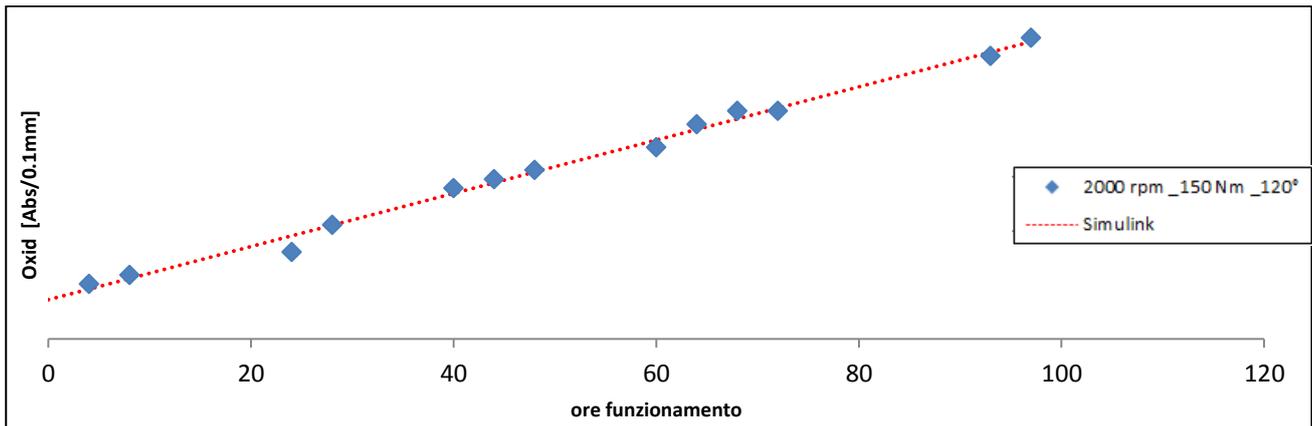
Figura 4.9) modello software verifica viscosità;

Dall'immagine è facile notare come il modello entra in lettura solo quando sono contemporaneamente soddisfatte tutte le condizioni iniziali. Possiamo anche notare che è stato posto un delay sull'acquisizione, con l'obiettivo di consentire la lettura solo se le condizioni di vincolo sono rispettate per un certo periodo, allo scopo di compiere le misurazioni in condizioni più stazionarie possibili.

Anche in questo caso è presente il bit di cambi olio, con lo scopo di azzerare il valore iniziale di riferimento. È semplicemente svuotata la memoria e riacquisito il valore di pressione olio nuovo all'avviamento successivo.

### 4.3) fase di verifica preliminare del software

Dopo la progettazione preliminare si è svolta la fase di verifica del software, che prevede l'eliminazione iterativa degli errori strutturali e la verifica della ripetibilità dei risultati. Sfruttando le rette d'invecchiamento a punti fissi, impiegate per generare il modello, è possibile valutare la corretta progettazione del software.



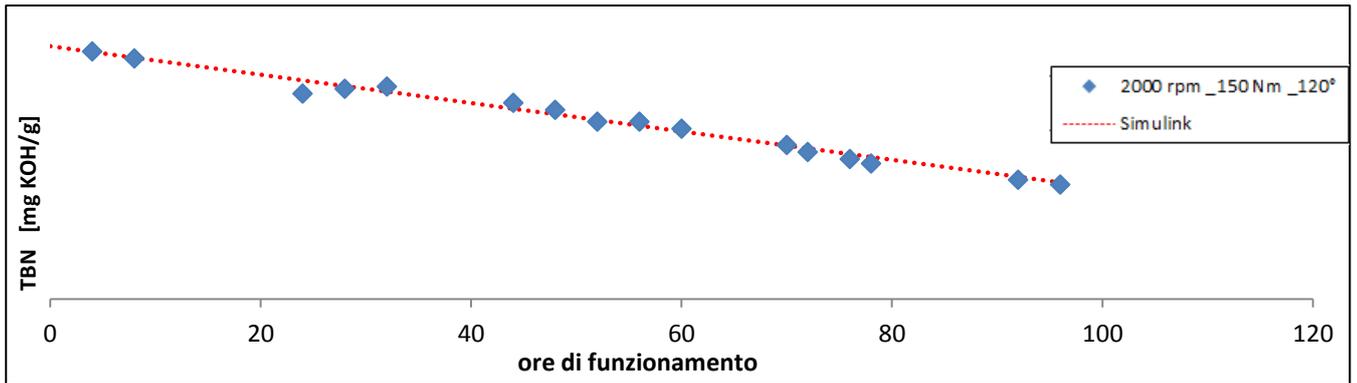


Figura 4.10) confronto modello Simulink dati reali;

Osserviamo come il software approssima in maniera esatta la variazione sia di TBN, che di ossidazione (figura 4.10).

Tramite questa verifica è stato possibile verificare la corretta architettura del modello Simulink.

Il passo successivo è stato quello di sviluppare, in collaborazione con Bosch, un modello preliminare da poter implementare in centralina, con struttura del tutto identica a quello sviluppato internamente in Ferrari.

Nasce così la possibilità di impiegare il modello direttamente in vettura, per avviare la fase di debug.

## Capitolo 5

### Applicazione del modello al banco prova e in vettura

Per la verifica del modello sfruttiamo dati e analisi olio provenienti da vetture che compiono test di durata motopropulsore.

Questa prova specifica prevede percorrenze lunghe (kilometraggio variabile in funzione del modello, fino a 40.000 Km nel nostro caso), con lo scopo di deliberare l'intero motopropulsore in ottica utilizzo cliente.

Si compone di varie missioni, con l'intento di ricoprire tutti i tipi di funzionamenti che possono essere messi in atto da un potenziale cliente, svariando da un impiego urbano fino ad un uso pista. Questo permetterà di verificare il corretto funzionamento del modello ai vari range di funzionamento.

Le vetture analizzate nella fase di debug software, sono tutte equipaggiate con un propulsore F 154 CD. Motore che presenta alcune differenze costruttive rispetto al F154CB, impiegato nella fase iniziale di acquisizione dati, ma che per le caratteristiche riguardanti l'intero circuito olio può essere considerato del tutto simile.

Le informazioni necessarie per svolgere un'analisi accurata sono:

- tipo di missione svolta durante i test;
- acquisizione in continuo di tutti i parametri in ingresso al modello durante la missione;
- Risultati del modello Bosch al termine di ogni missione;
- Km percorsi;
- Storico ben dettagliato dei vari rabbocchi e sostituzioni olio durante l'intero test di durata;
- Campioni olio molto ravvicinati in termine di Km di percorrenza per evidenziare errori del modello;

La prima verifica consiste nel confrontare il modello sviluppato da Bosch con quello creato in Ferrari, per discriminare errori di modellazione da parte di Bosch.

Da questa fase di verifica è possibile notare la perfetta correlazione tra i due software (figura 5.1); esistono dei piccoli sbandamenti, probabilmente dovuti a Km mancanti nelle acquisizioni provenienti da vettura.

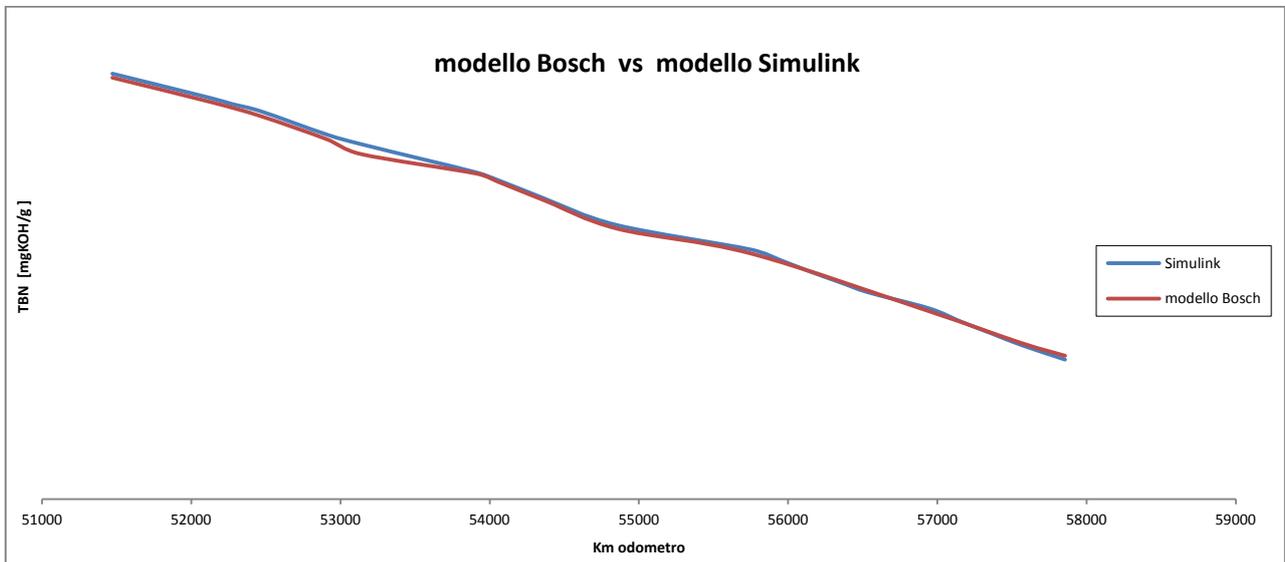
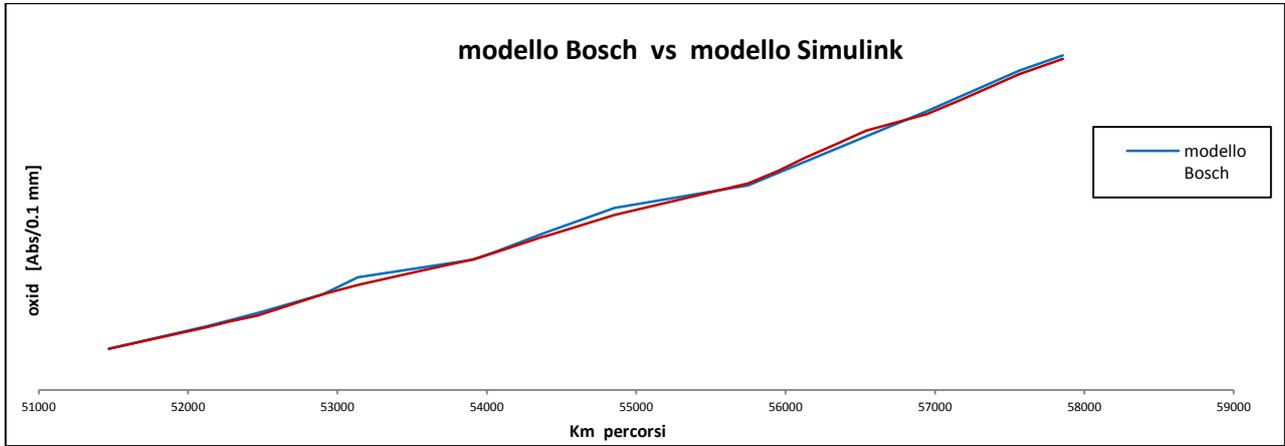


Figura 5.1) confronto Bosch vs Simulink;

## 5.1) Analisi ossidazione

Valutando i risultati, per quanto riguarda il degrado d'ossidazione, osserviamo un andamento altalenante.

Il nostro modello sembra essere ben allineato in certe condizioni mentre sembra perdere totalmente coerenza in altre circostanze.

L'errore di stima che si denota non è però ripetibile, si osservano sia casi di sovrastima, ma anche di sottostima su missioni vettura uguali, come riportato in figura 5.2.

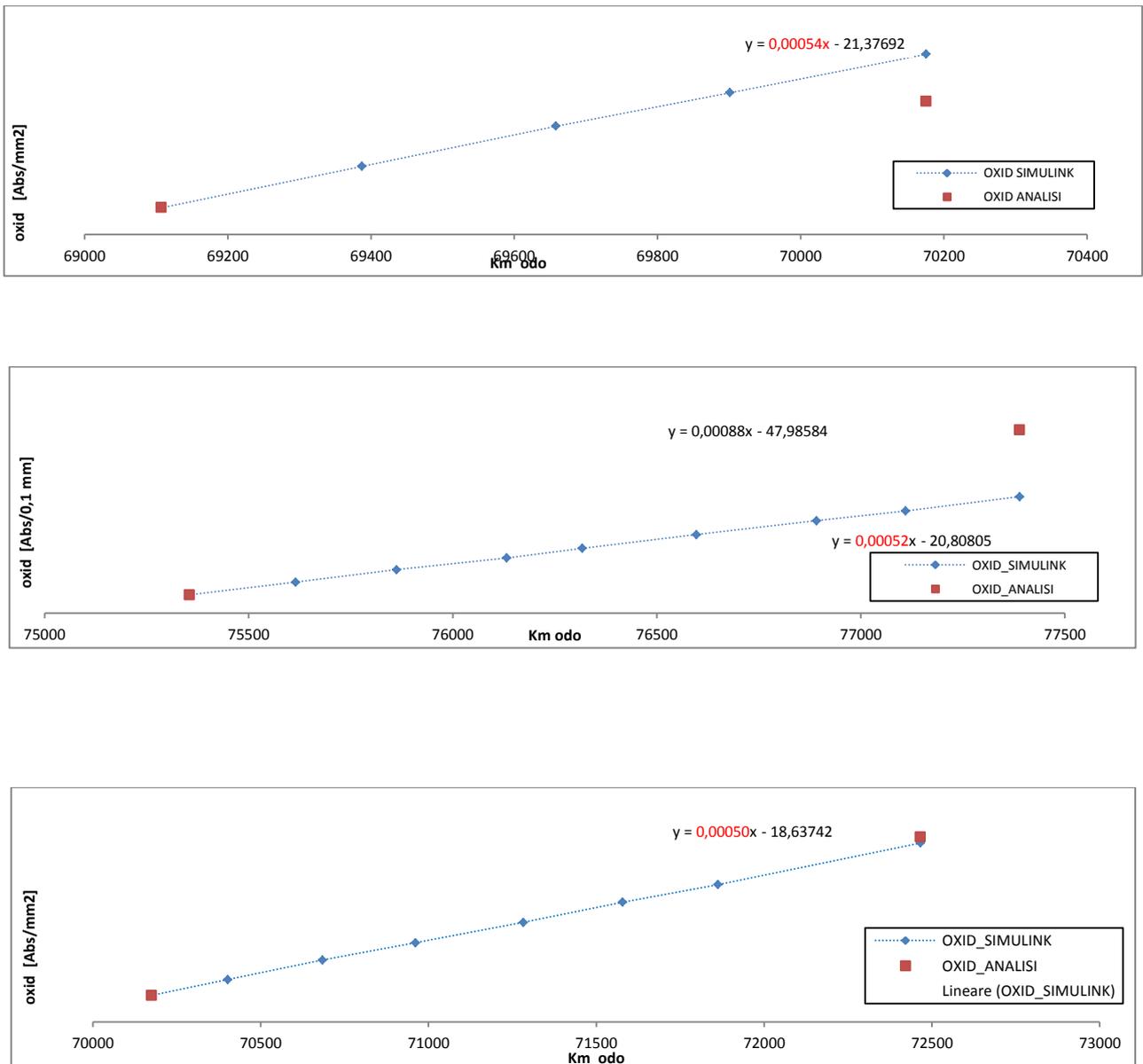


Figura 5.2) andamento ossidazione;

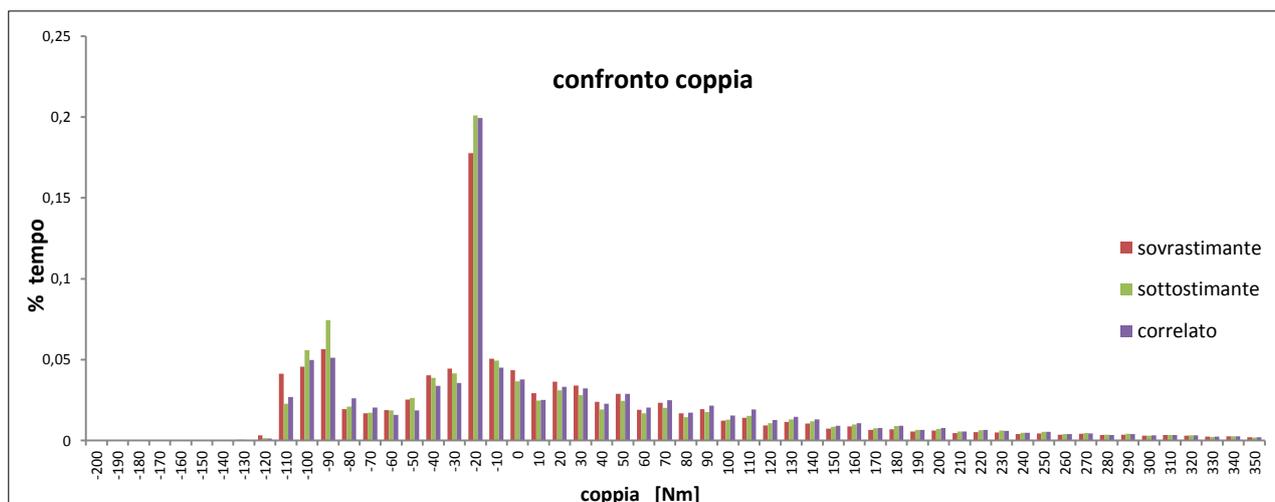
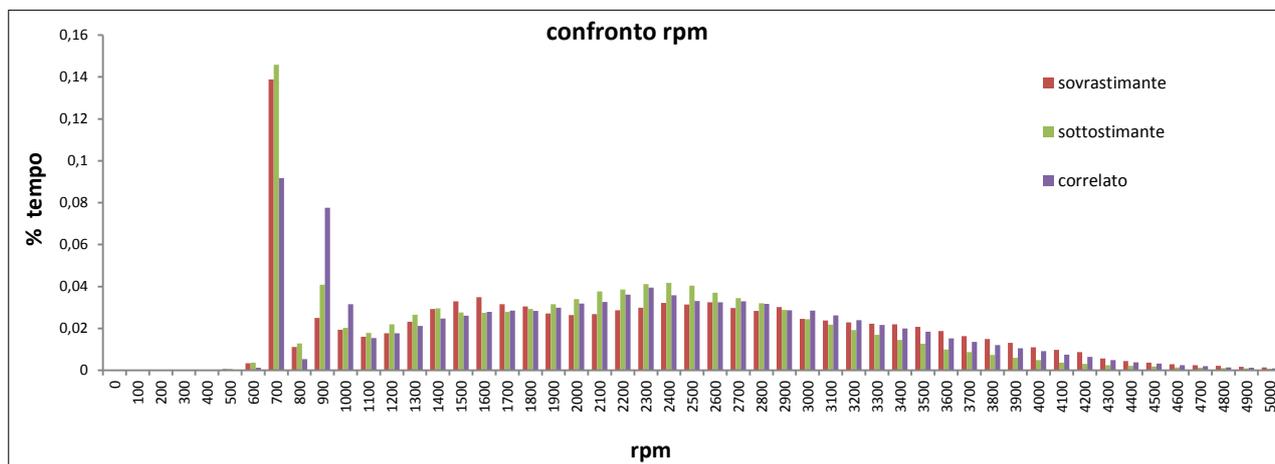
Entrando più nello specifico è possibile osservare che l'errore di stima non è attribuibile ad un errore del modello, bensì potrebbe essere riconducibile a un errore di misura dello strumento oppure ad un parametro non modellato.

Verifichiamo questo valutando la percentuale di tempo, tra un'analisi olio e l'altra, trascorsa a ogni regime, carico e temperatura del lubrificante.

Osserviamo che i vari cicli, sia sottostimanti sia sovrastimanti, hanno distribuzione giri e carico motore del tutto paragonabile alla distribuzione che stima correttamente l'invecchiamento.

Questo è anche confermato dalla medesima pendenza della retta d'invecchiamento (figura 5.2) stimata dal software che, analizzando distribuzioni molto simili genera risultati confrontabili.

In figura 5.3 riportiamo i grafici di tempo percentuale dei tre cicli sopra analizzati che mostrano visivamente una buona sovrapposibilità.



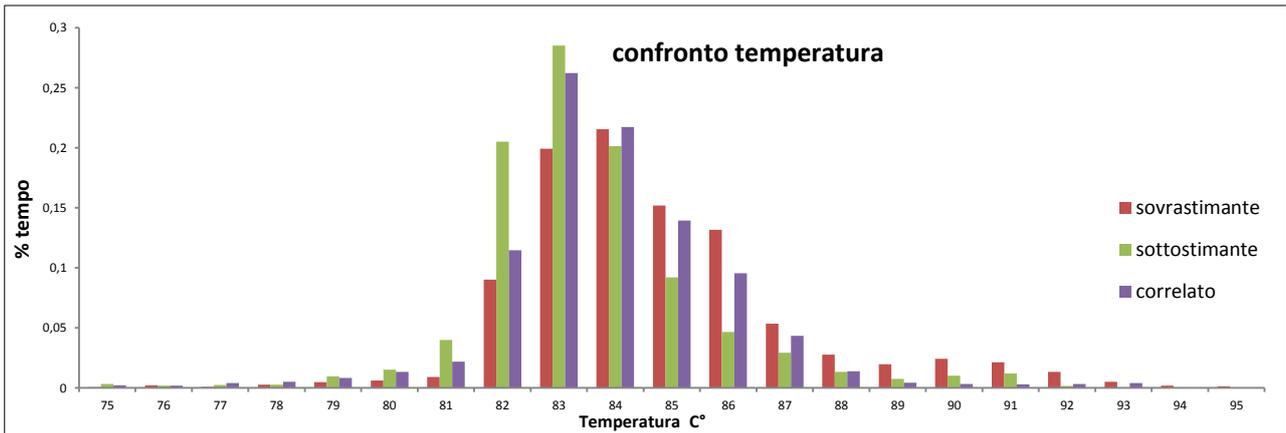


Figura 5.3) distribuzione percentuale regimi, coppie e temperature;

l'analisi svolta ci spinge ad assumere l'errore analizzato in questi cicli come incertezza da assegnare ai risultati generati dallo strumento di misura.

Si sceglie di porre un'incertezza, per quanto riguarda l'ossidazione, che si aggira nell'intorno di  $\pm 1$  [Abs/0,1 mm].

In quest'ottica l'analisi dei risultati offre buona confidenza sulla stima software del degrado per ossidazione anche per tempi di percorrenza importanti. Evidenziamo una componente leggermente sovrastimante del modello che come analizzeremo in seguito, non risulterà essere del tutto negativa. In figura 5.4 è riportato il trend di ossidazione durante un percorso in durata vettura di 20.000 Km, chilometraggio massimo percorribile senza effettuare il cambio olio.

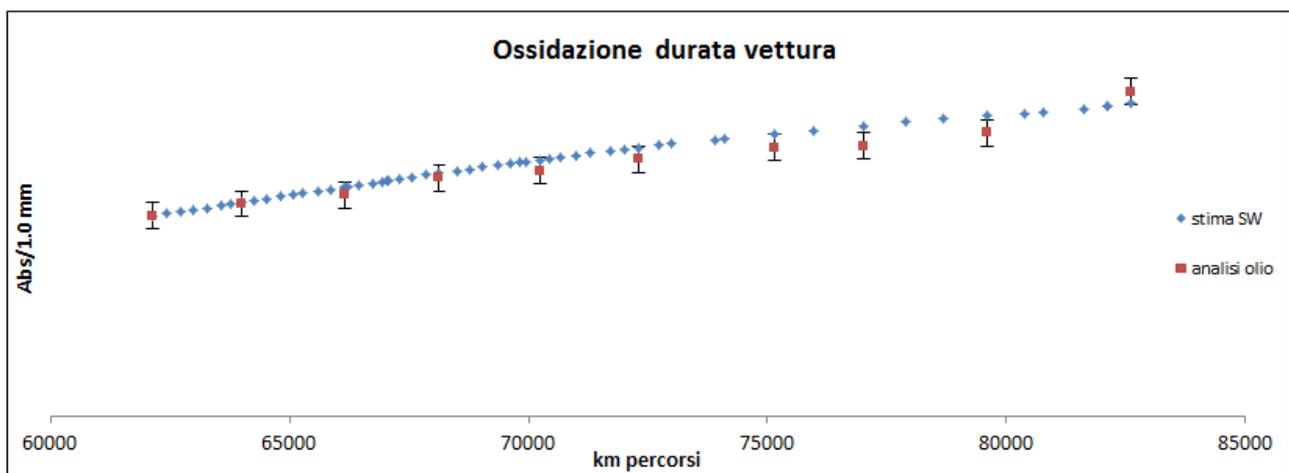


Figura 5.4) ossidazione di durata vettura con errore di misura;

Lungo tutta la durata, la stima del nostro software (rappresentata dagli indicatori azzurri) approssima abbastanza fedelmente il trend delle misure (indicatori rossi), rimanendo nell'intorno dell'errore di misura definito in precedenza.

Possiamo affermare che, per una percorrenza di 20.000 Km il nostro modello è in grado di stimare il degrado per invecchiamento con un'incertezza di  $\pm 1$  Abs/0,1 mm. Resta da definire cosa significa assumere tale incertezza in termini di Km di percorrenza.

Nota la composizione del test di durata (vedi tabella 5.1), mediante l'impiego del modello, definiamo un tasso d'invecchiamento per Km legato a ogni missione vettura.

MARANELLO					NARDO'				
U	S	Fior	C	AS	NB	NV	AV	N	KM TOT
1000	9000	4000	2000	2000	9000	6000	2000	1000	36000

Tabella 5.1) Km per ogni ciclo che compone la durata vettura;

Moltiplichiamo poi i coefficienti appena stimati per i Km previsti in durata per ogni ciclo (tabella 5.1). Partendo dal ciclo più stressante in termini di ossidazione per Km per finire con il meno severo (percorso A), e viceversa, partendo da quest'ultimo fino ad arrivare al più severo (percorso B) otteniamo un grafico a foglia in grado di fornirci numerose informazioni legate all'invecchiamento per ossidazione (figura 5.5).

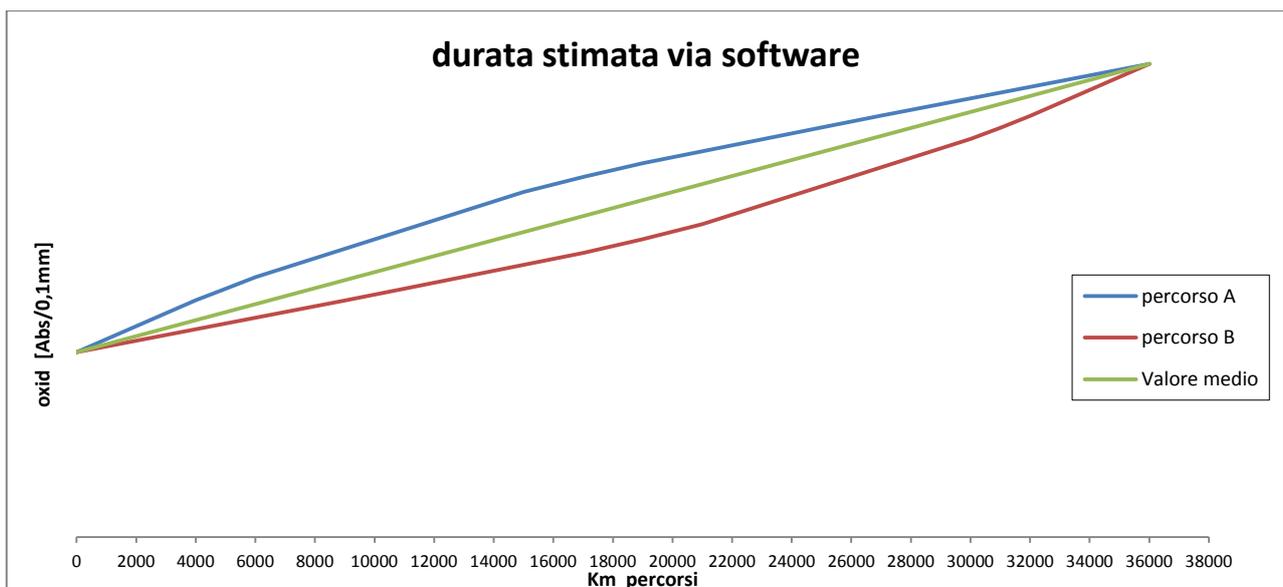


Figura 5.5) riproduzione via software dell'ossidazione cumulabile in durata;

Fissando un valore di Km percorsi, come possiamo vedere in figura 5.6, evidenziamo due estremi di ossidazione, all'interno dei quali dovremo trovarci dopo 20.000 Km di durata, cioè al primo cambio olio.

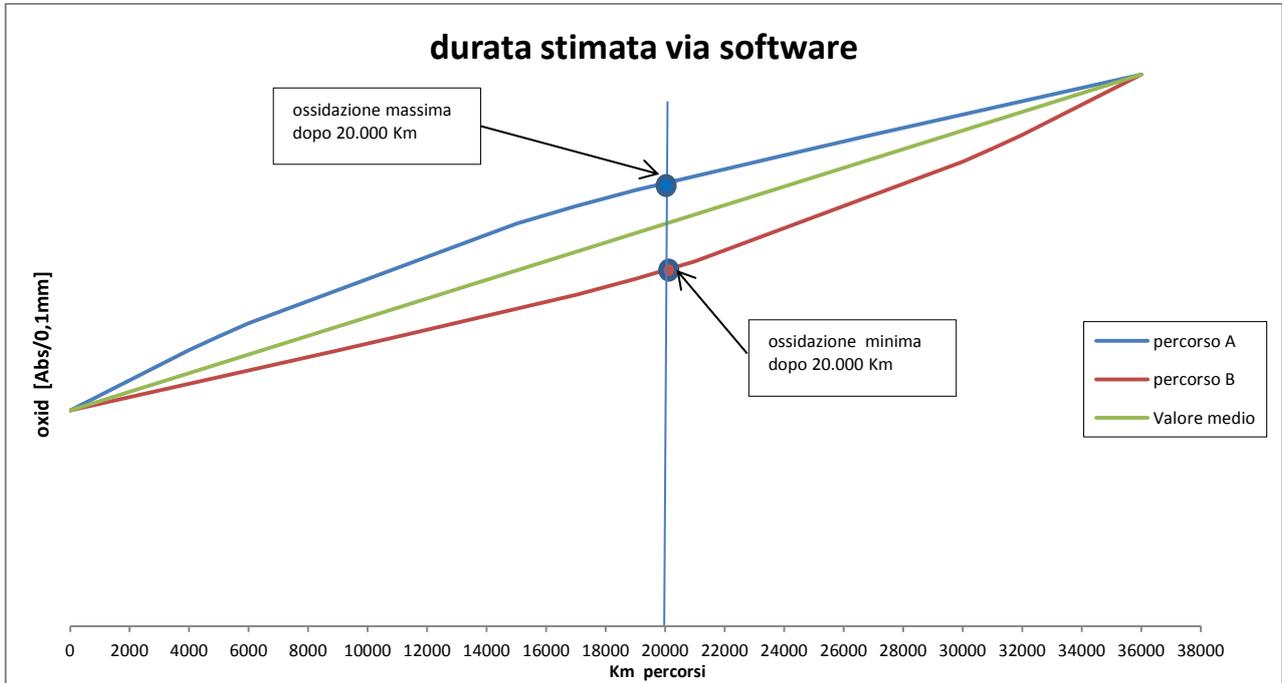


Figura 5.6) valori di ossidazione attesa per un valore scelto di Km percorsi;

Allo stesso tempo, possiamo conoscere il valore massimo e il valore minimo di Km percorribili per un dato valore d'ossidazione.

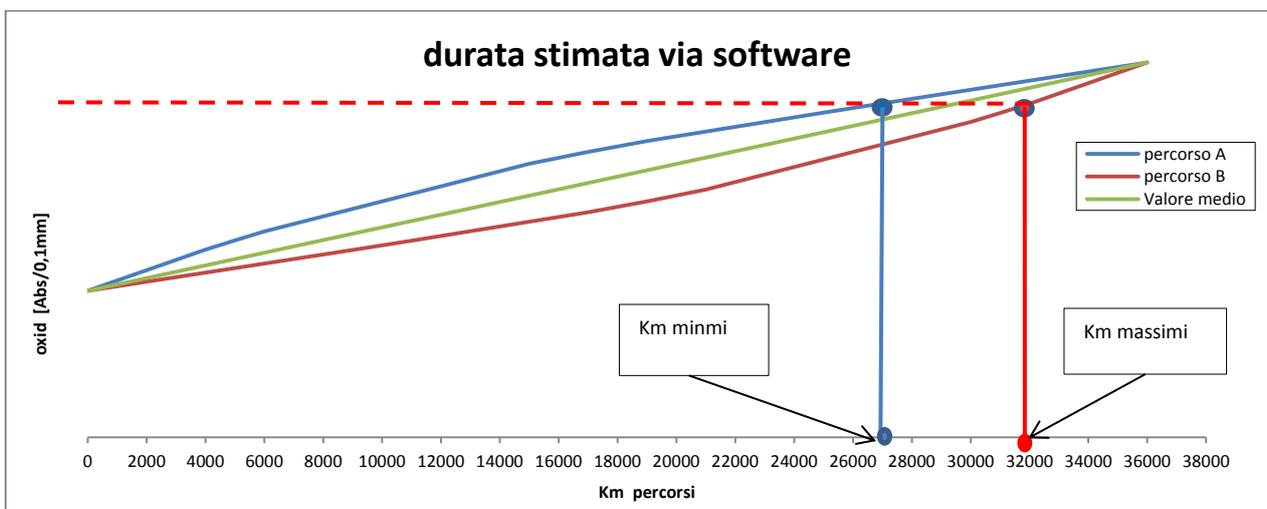


Figura 5.7) Km massimi e minimi percorribili per un dato valore di ossidazione;

Infine, sfruttando il valor medio di ossidazione per Km che possiamo attribuire al test di durata, siamo in grado di definire a quanti Km corrisponde un invecchiamento di 1 [Abs/0,1 mm] che rappresenterà il massimo errore commesso dal modello (figura 5.8).

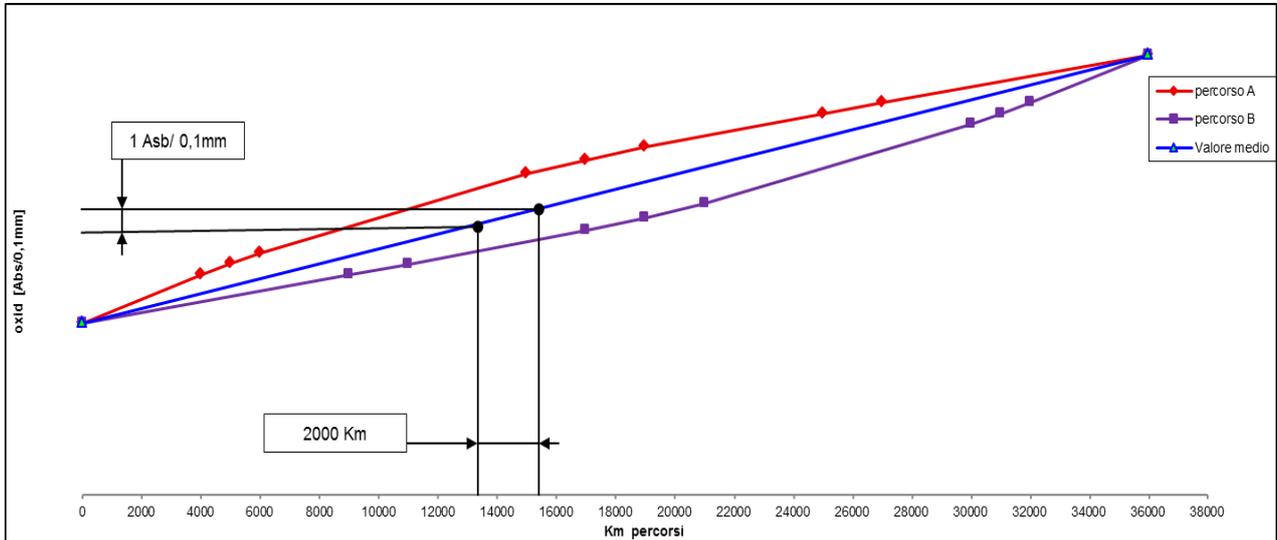


figura 5.8) errore ripartito in Km;

Il risultato che si ottiene è dell'ordine dei 2000 km, considerato del tutto accettabile.

Quest'analisi è stata svolta simulando i percorsi della durata mediante il software; per verificare la corretta stima del modello plottiamo tutti i valori di ossidazione derivanti dai campioni ottenuti in vettura (figura 5.9).

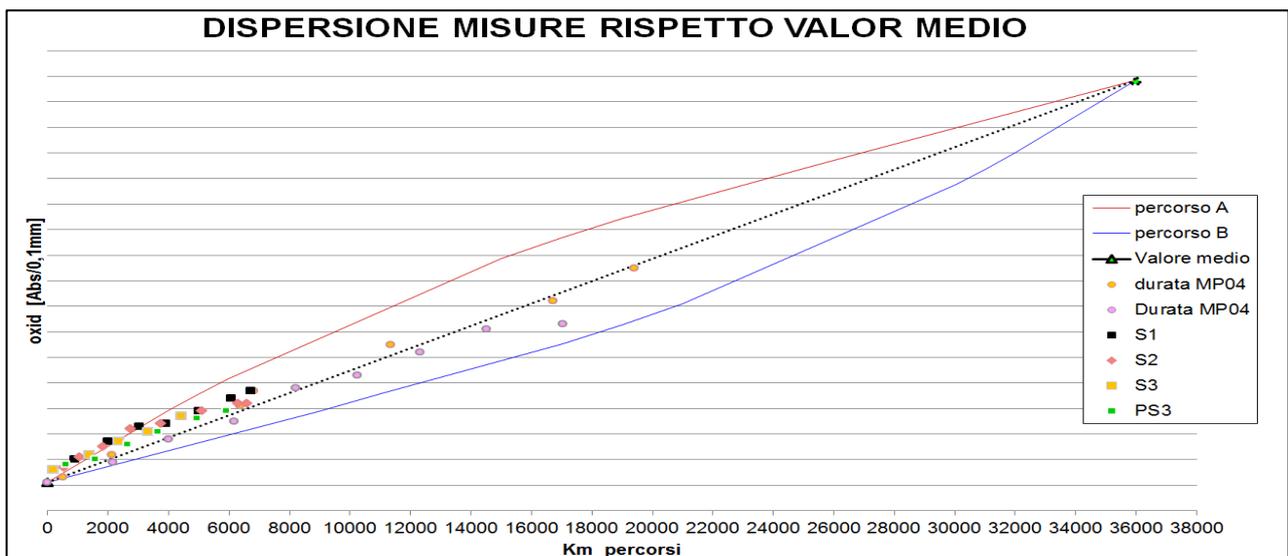


Figura 5.9) dispersione misure rispetto valore medio;

Notiamo come tutte le misure reali ricadono all'interno del grafico a foglia e come i trend approssimino abbastanza correttamente l'andamento della linea media. Verifichiamo in questo modo la corretta approssimazione della linea media e di conseguenza la valutazione in Km dell'errore associato alla misura.

Riportiamo di seguito la stima di un'intera durata vettura modellata dal software, correlata dalle analisi olio.

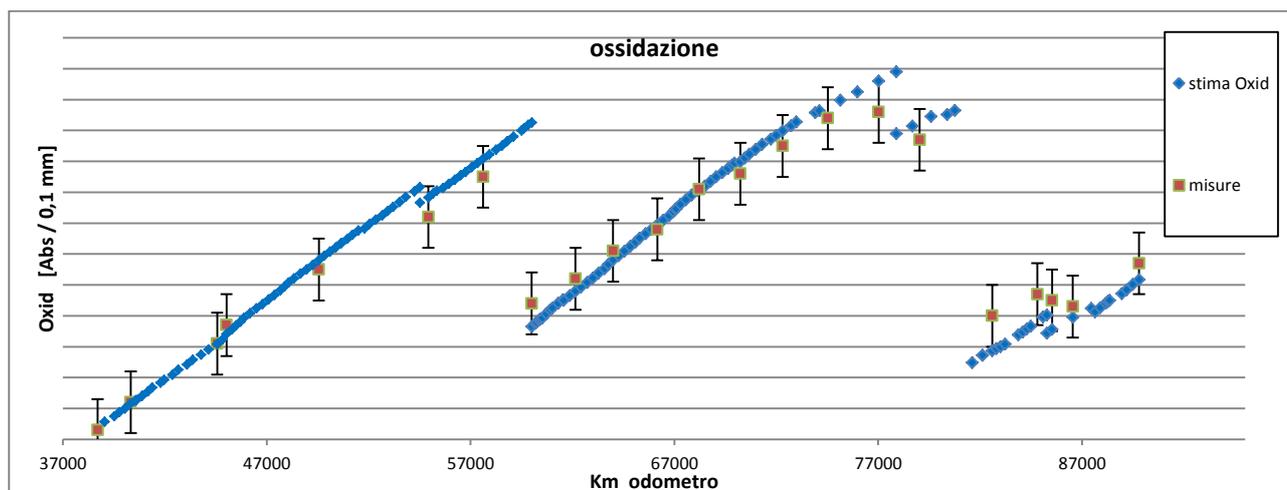


Figura 5.10) analisi di un'intera durata;

Il software ripercorre la durata svolta dalla vettura, rimanendo all'interno dell'errore associato alle misure.

Gli scostamenti maggiori tra dati reali e le stime si evidenziano ai cambi olio, dove il software risulta essere al limite dell'incertezza. La caratteristica sovrastimante del modello permette di ridurre queste discrepanze e aumentare la confidenza dei risultati nel punto di maggior interesse, i 20.000 Km.

## 5.2) Analisi modello di Neutralizzazione

L'approccio alla stima del processo di neutralizzazione del lubrificante, mediante l'utilizzo del software, ha immediatamente evidenziato alcune problematiche.

Già nella fase iniziale che ha permesso di generare i dati necessari alla composizione del modello, si erano riscontrati trend di neutralizzazione non fisici.

In figura 5.11 osserviamo come, in un test a basse temperature, i valori della riserva basica generati dalle analisi, anziché calare, tendono ad aumentare in relazione al tempo di funzionamento.

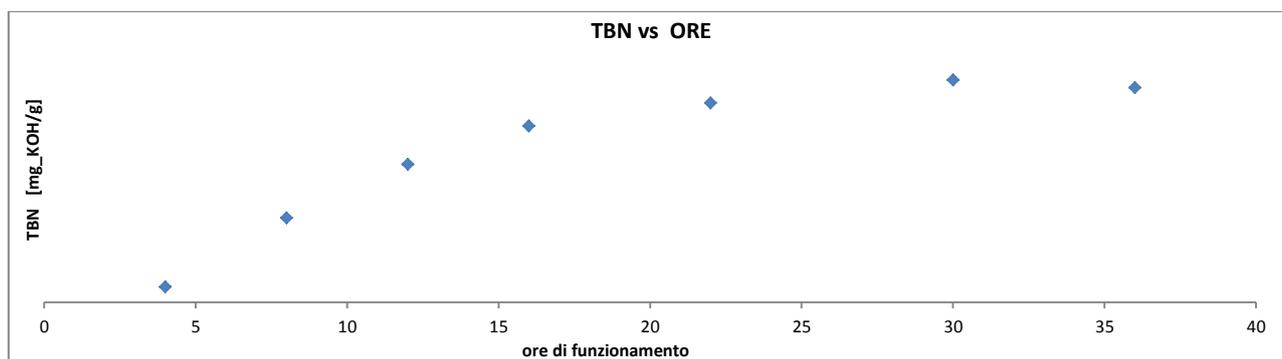


Figura 5.11) andamento TBN con olio diluito;

Il fenomeno è stato correlato alla presenza di benzina come inquinante nell'olio.

In figura 5.12 riportiamo i valori di TBN in funzione della diluizione da benzina nel lubrificante.

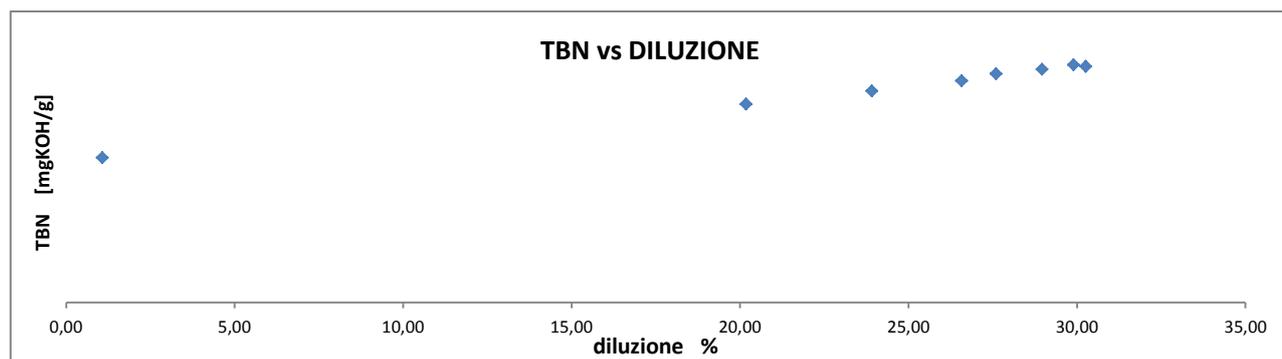


Figura 5.12) relazione TBN / diluizione;

La diluizione non provoca realmente un aumento di riserva basica, bensì errori nella lettura dello strumento.

Lo strumento di misura, valuta la variazione di riserva basica integrando l'area nell'intorno del picco di assorbanza legato alla neutralizzazione.

L'inquinamento da benzina, influisce proprio sull'area del picco, aumentandola, e facendo registrare valori più bassi.

Questo fenomeno è ben visibile anche nella prova di durata, ( figura 5.13) dove in etichetta sono riportati i valori di diluizione.

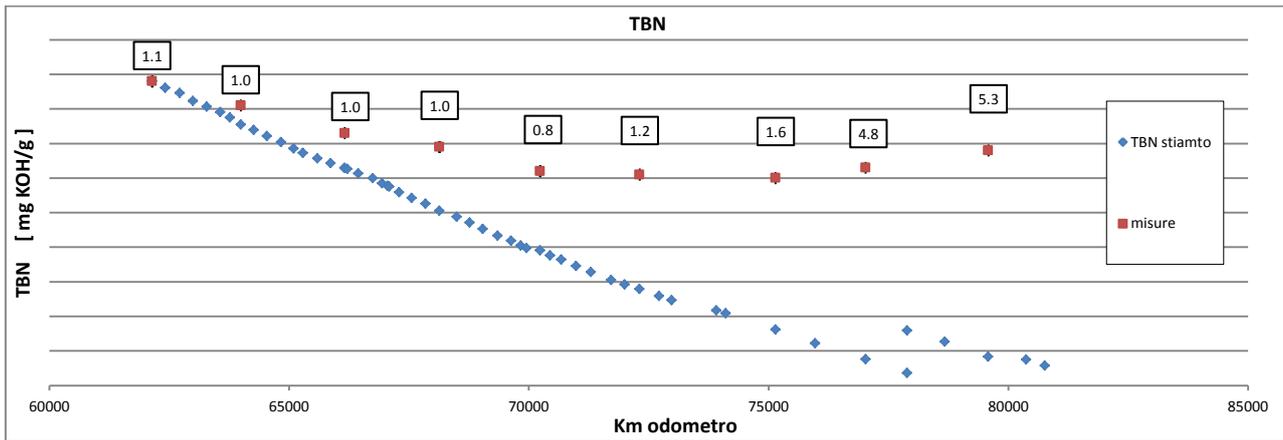


Figura 5.13) andamento software e misure reali;

Per poter verificare il corretto funzionamento del modello, sfruttiamo parte della durata vettura nella quale i valori di diluizione dei campioni si sono mantenuti costanti.

In questo intervallo, l'errore commesso dallo strumento sulle misure risulta essere a sua volta costante, sarà così possibile analizzare la caratteristica del modello.

Esso è sovrastimante, come mostrato in figura 5.14.

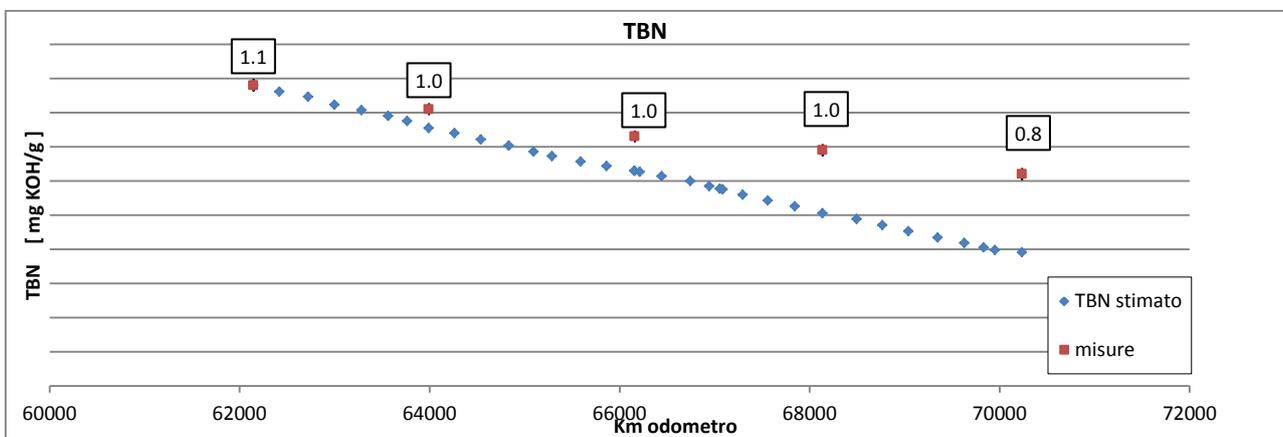
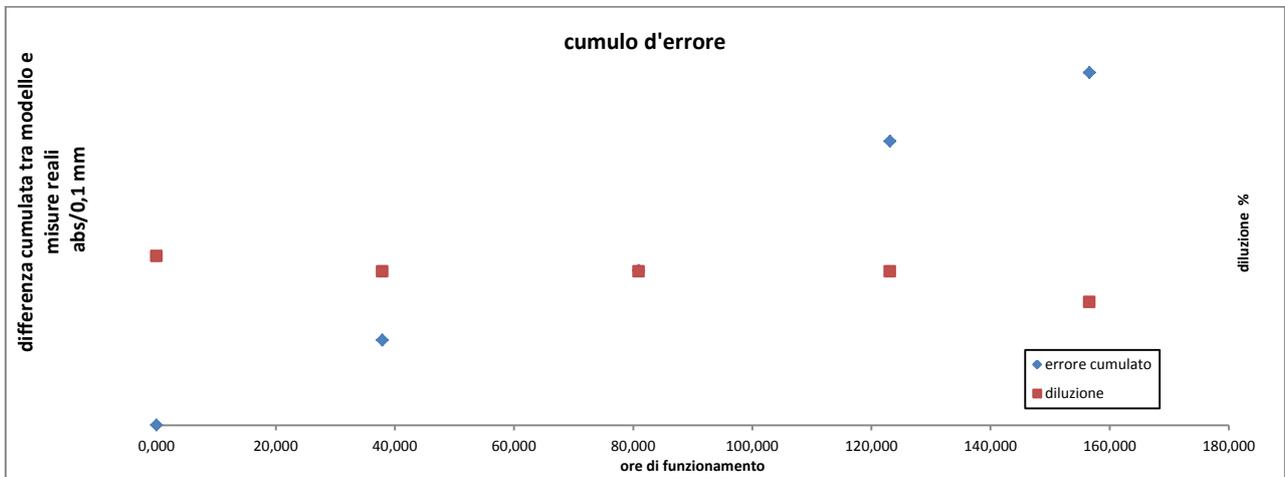


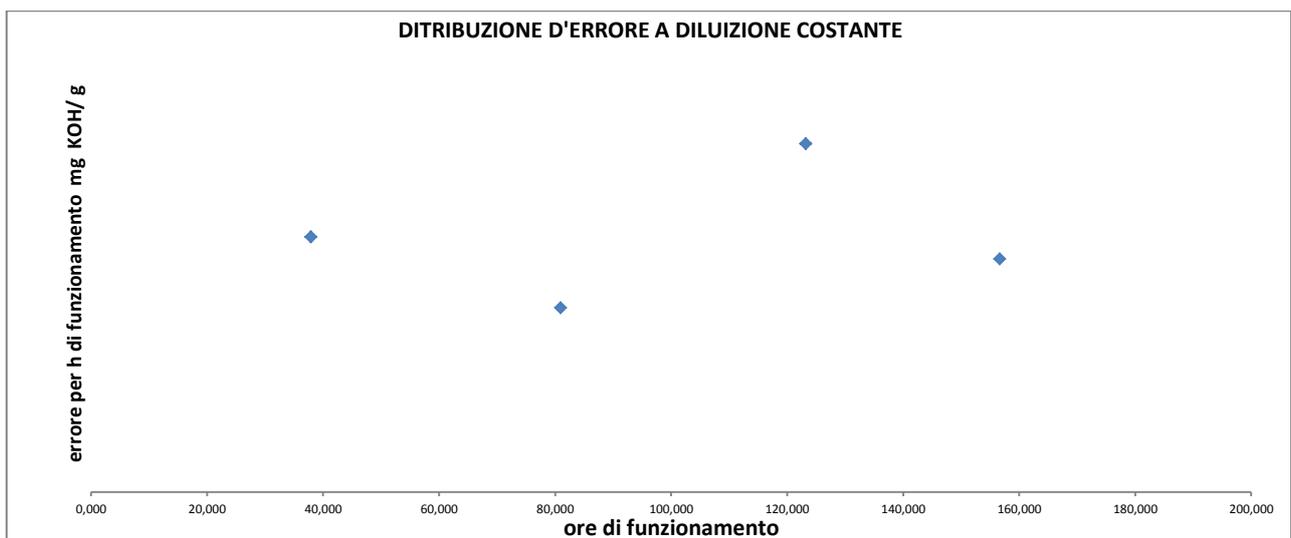
Figura 5.14) andamento software in tratto a diluizione costante;

Essendo una parte di durata composta da cicli uguali, quindi con regimi, coppie e temperature olio paragonabili, osserviamo come l'errore che il modello commette sia lineare con il tempo.



5.15) cumulo d'errore nel tempo di utilizzo software;

Ripartendo l'errore di sovrastima commesso dal modello tra misure consecutive rispetto al tempo di funzionamento tra le medesime misure, siamo in grado di valutare un coefficiente correttivo. In figura 5.16 riportiamo i valori dei coefficienti correttivi ottenuti nell'intervallo a diluizione costante.



5.16) errore per ora di funzionamento nei tratti a diluizione costante;

Mediando questi valori, e applicando la correzione al software, siamo in grado di migliorare i risultati stimati di neutralizzazione, come si può osservare in figura 5.17.

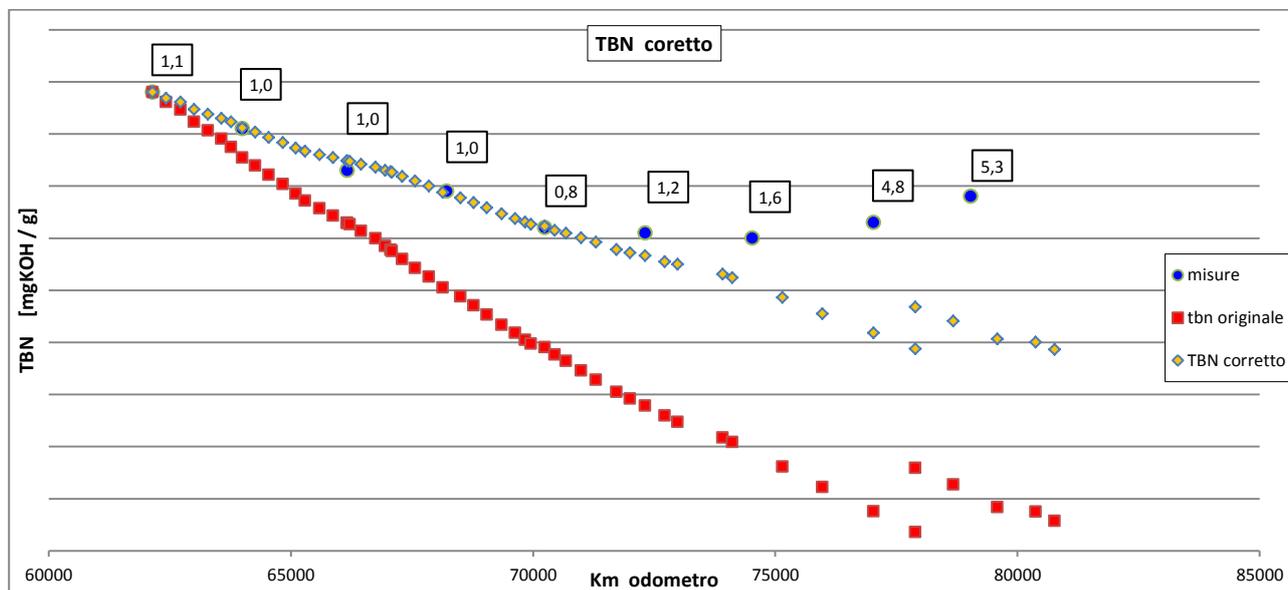


Figura 5.17) modello di TBN corretto;

Dalla correzione imposta, otteniamo un miglioramento nella stima dei valori di neutralizzazione soprattutto nel tratto iniziale.

L'aumento della diluizione però, non permette di analizzare i risultati nella parte conclusiva del test. Si ha la necessità d'indagare la relazione che esiste tra l'aumento di diluizione e valori misurati di TBN.

Ciò che ci si attende è osservare un calo di TBN proporzionale ad un calo di diluizione.

Nella pratica però, la diluizione è un parametro stimato tramite i valori reali di viscosità. Per una correlazione più robusta, riferiremo d'ora in poi, la variazione di riserva basica alla variazione di viscosità, con relazione di proporzionalità inversa.

Valutiamo prove con lo scopo di favorire l'evaporazione della benzina dall'olio.

In prima battuta, analizziamo gli effetti sull'evaporazione, lasciando i campioni aperti.

Da questa prova non siamo in grado di osservare nessuna variazione di viscosità o di TBN, l'unico effetto, se pur minimo, è quello di aumentare i ppm d'acqua contenuti nell'olio.

Il passo successivo, è stato quello di intervenire sui legami creati tra olio e benzina mediante riscaldamento.

Mantenendo in forno per mezz'ora campioni a una temperatura di 60° otteniamo una minima variazione di TBN.

Sebbene la variazione sia dell'ordine della ripetibilità dello strumento, in tutti i campioni osserviamo un abbassamento del valore di riserva basica, in accordo con quanto atteso.

Tentiamo quindi di forzare l'evaporazione, aumentando la temperatura. Partiamo mantenendo i campioni in forno per 5 ore a 100°, con un effetto netto sulla viscosità e sul TBN.

Quello che emerge dalle analisi, è una diminuzione dei valori di TBN correlato a un aumento di viscosità.

Ripetiamo pertanto la prova aumentando nuovamente la temperatura, raggiungendo i 120°.

I risultati dimostrano come la diluizione nei campioni con valori iniziali molto alti non sia del tutto sparita; siamo comunque in grado di osservare la relazione ricercata, che permetterà, una volta noto il valore di viscosità del campione, di correggere i risultati forniti dallo strumento in termini di neutralizzazione.

In figura 5.18 riportiamo i risultati ottenuti.

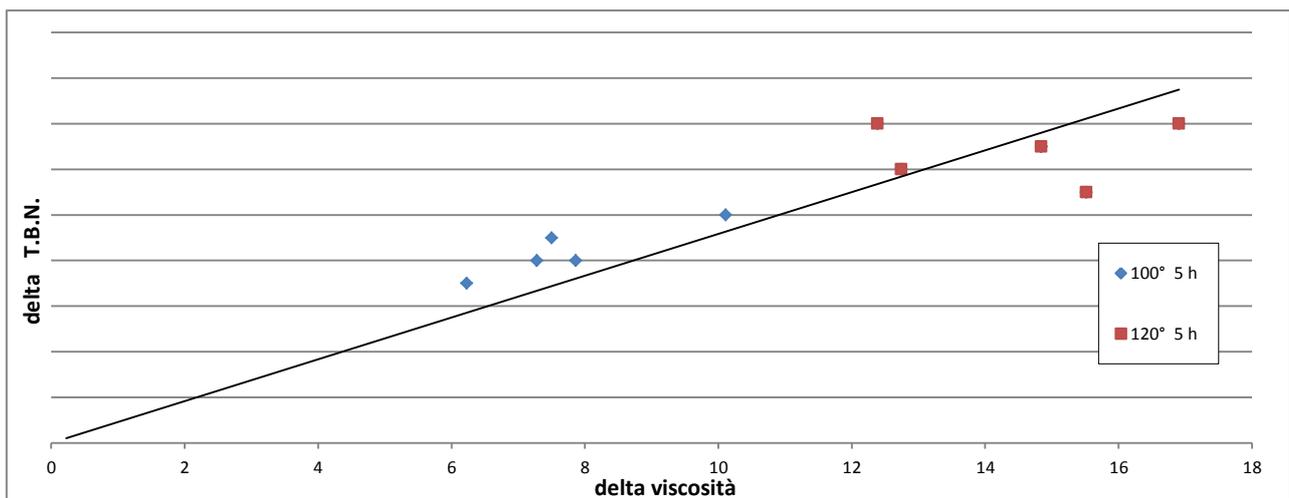


Figura 5.18) rapporto tra variazione di viscosità ed errore commesso sulla misura;

Applicando questa correzione alle misure effettuate sulla durata otteniamo i risultati di figura 5.19.

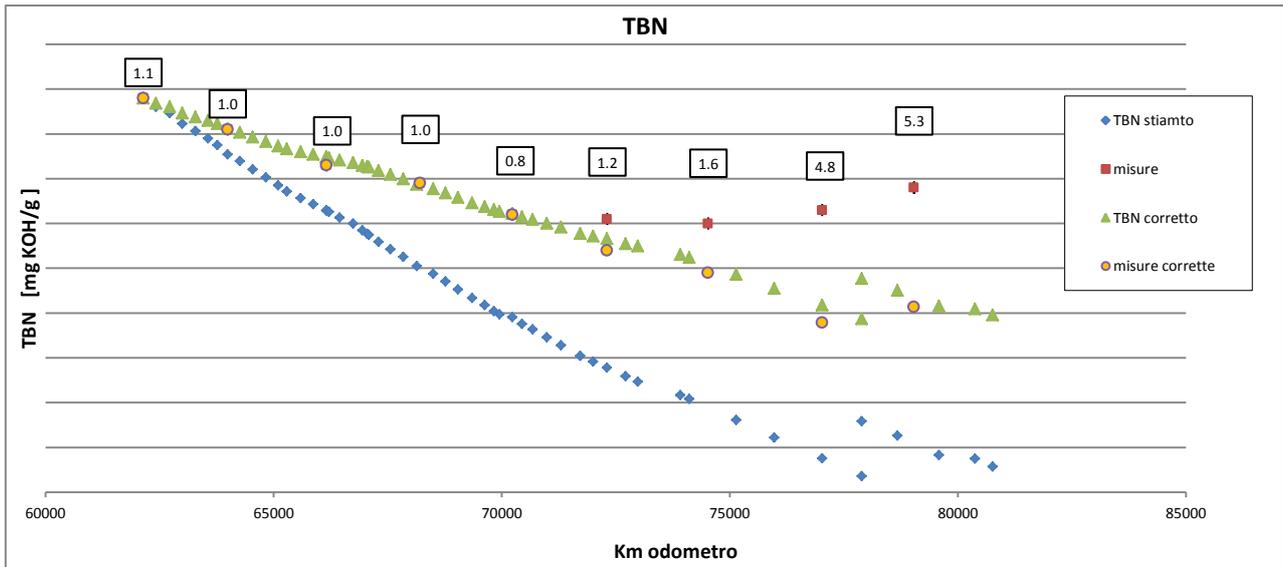


Figura 5.19) modello corretto e misure corrette;

Dall'applicazione delle correzioni sia sul modello sia sulle misure otteniamo una buona approssimazione del degrado per neutralizzazione.

Anche in questo caso definiamo un errore d'incertezza da associare alle misure nell'intorno di  $\pm 1$  [mg KOH/g] e, come nel caso precedente, verificheremo, estrapolando i coefficienti di neutralizzazione per Km, il degrado associato alla durata figura 5.20. Dove la curva A ripercorre la durata ordinando i cicli dal più degradante in termini di neutralizzazione al meno degradante, mentre la curva B simula la durata dal meno degradate al più degradante.

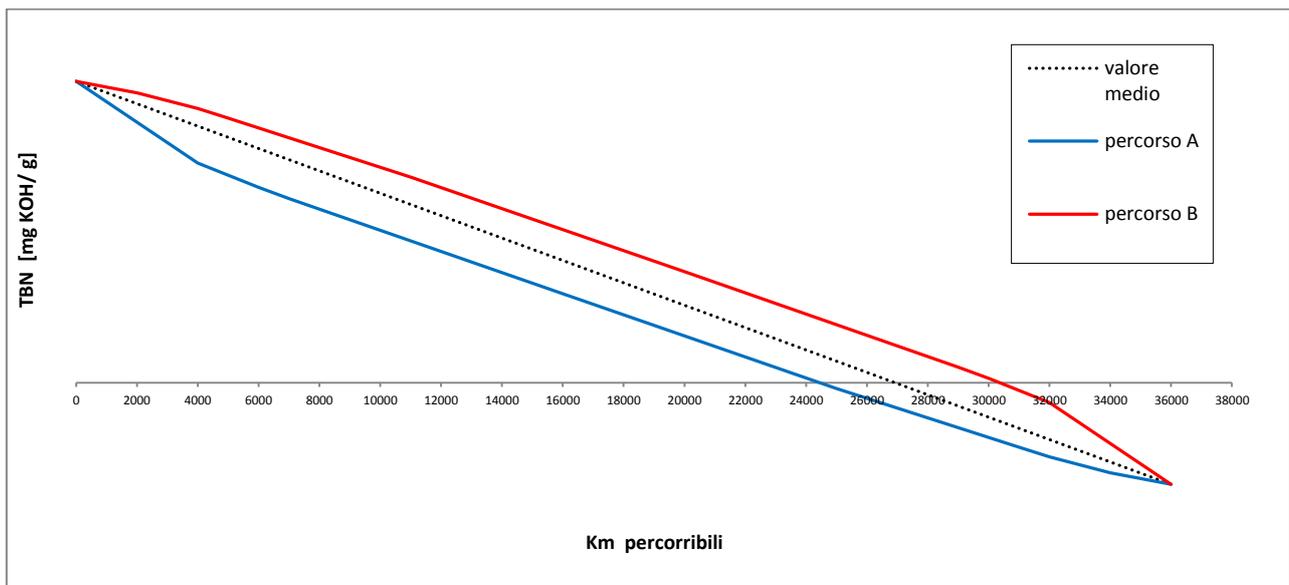


Figura 5.20) riproduzione via software della neutralizzazione cumulata in durata;

Siamo così in grado di stimare, anche per la neutralizzazione, valori massimi e minimi di TBN osservabili a 20.000 Km e i Km percorribili, fissato un limite inferiore (figura 5.21 e 5.22).

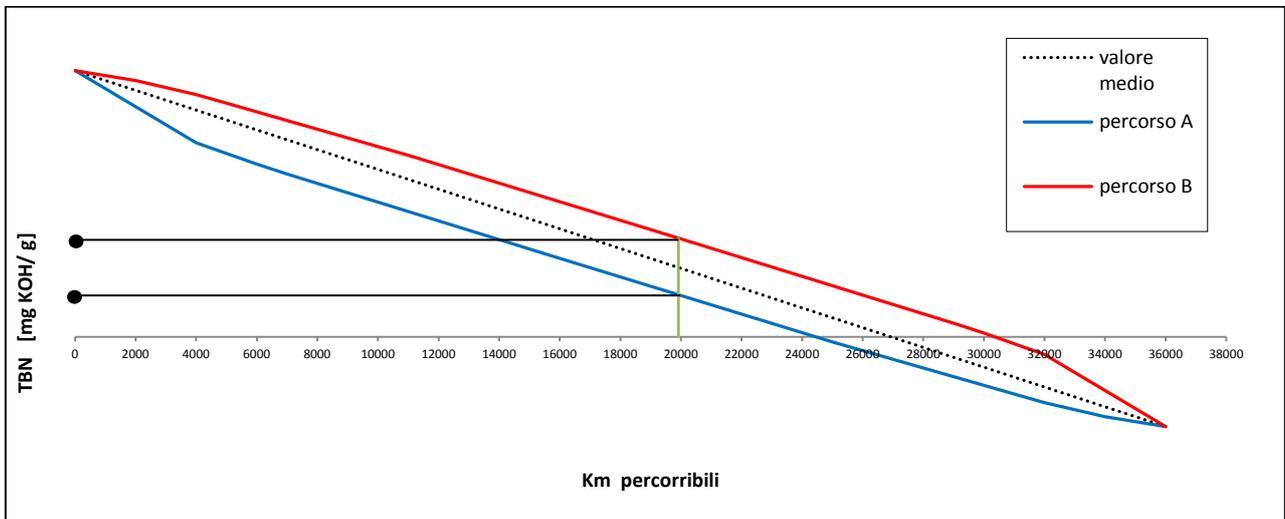


Figura 5.21) valori attesi di neutralizzazione massimi e minimi;

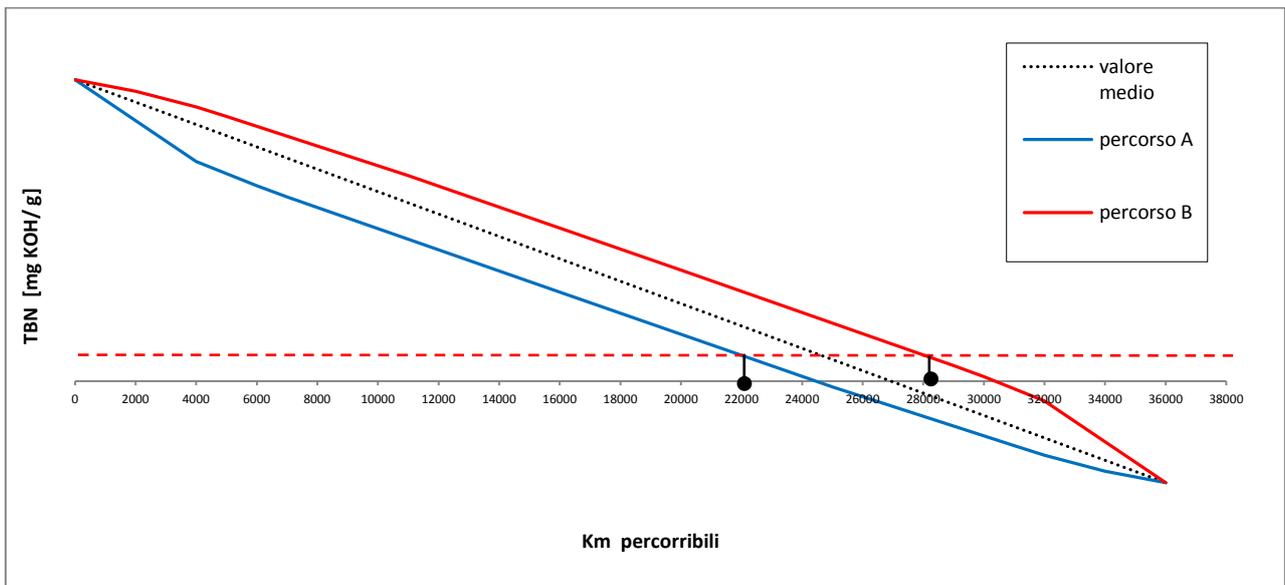


Figura 5.22) Km percorribili fissato un limite di neutralizzazione;

Possiamo analizzare i Km legati all'incertezza assunta, come già dimostrato nel caso dell'ossidazione, figura 5.23.

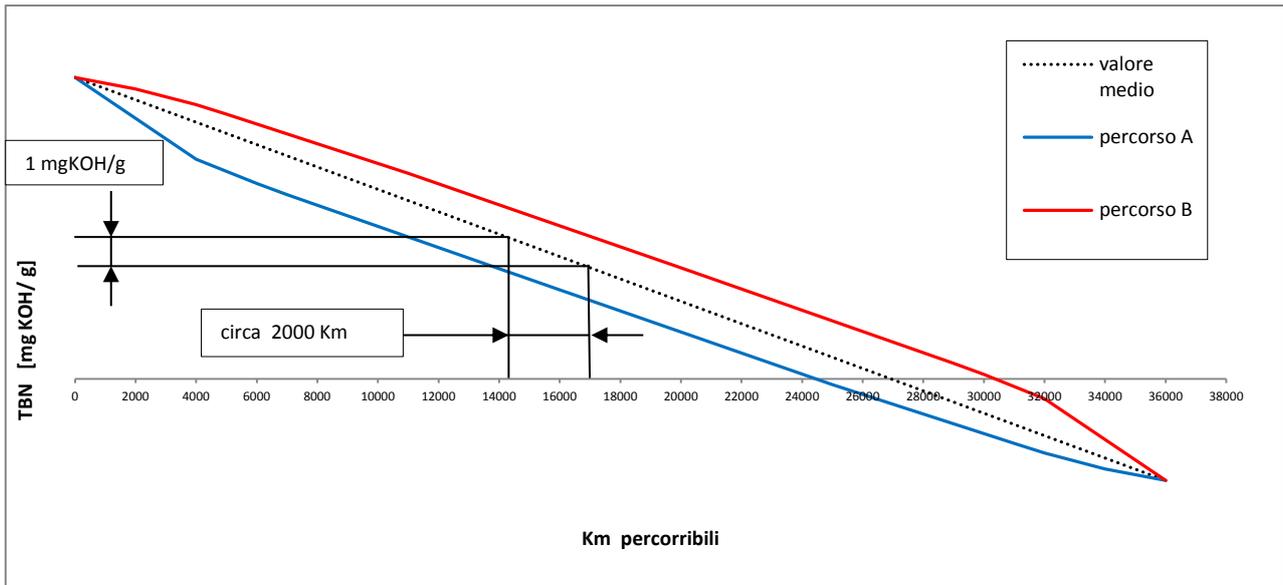


Figura 5.23) stima di Km associati all'incertezza sulle misure;

Osserviamo come i Km associati alle incertezze assunte sia in termini di ossidazione sia in termini di neutralizzazione siano paragonabili.

Infine, verifichiamo l'attendibilità della stima software plottando i risultati derivanti dalle analisi vettura sul grafico che stima la neutralizzazione sulla durata.

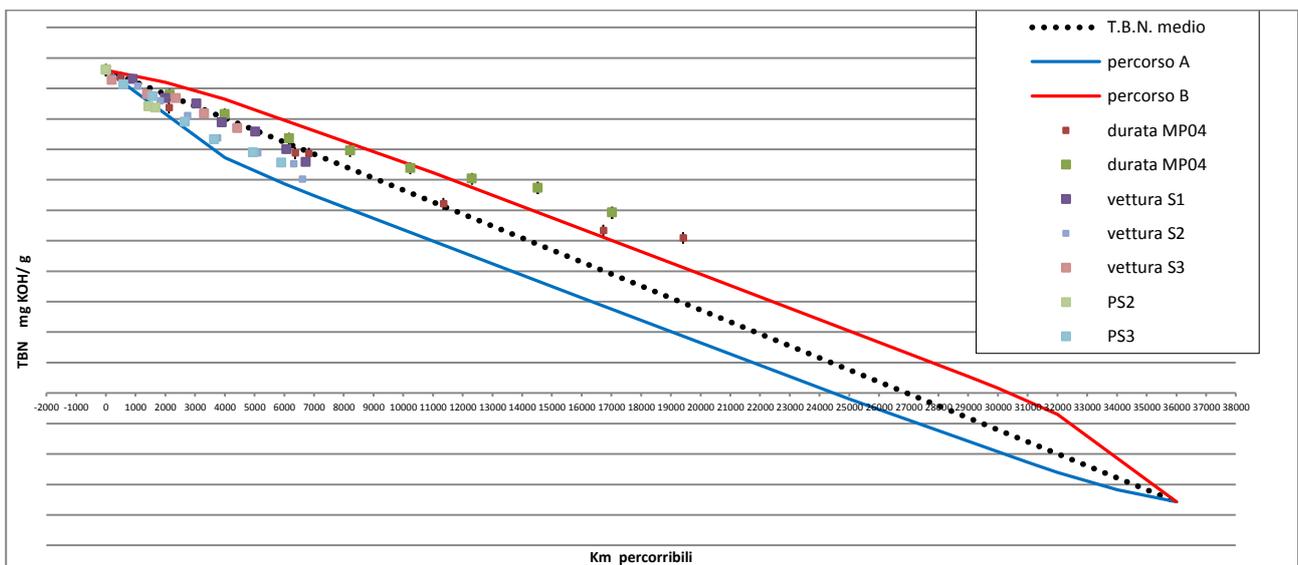


Figura 5.24) confronto valori id neutralizzazione attesa e misure reali;

Anche per il processo di neutralizzazione osserviamo come la distribuzione di campioni reali sia contenuta all'interno dei due estremi modellati dal software, garantendo una buona stima del valore di neutralizzazione media e di conseguenza dell'errore valutato in Km.

In figura 5.25 analizziamo la stima di TBN per un'intera durata vettura, dalla quale è possibile osservare, una volta corretto il modello e le misure in funzione della variazione di viscosità, la corretta approssimazione del modello.

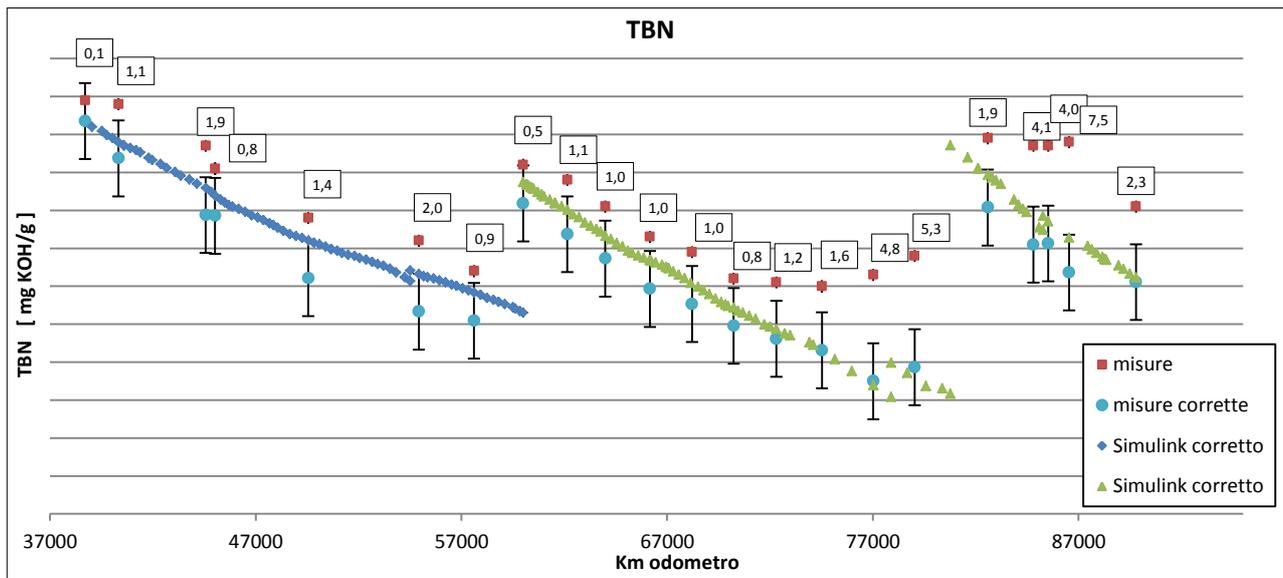


Figura 5.25) stima della neutralizzazione di un'intera durata vettura;

Come nel caso precedente, notiamo la criticità del modello a stimare correttamente i cambi olio ma, si denota comunque una buona confidenza al punto obiettivo di 20.000 Km.

Da un'analisi congiunta di neutralizzazione e ossidazione, graficando questi due invecchiamenti con i limiti imposti (Vedi paragrafo 3.5) possiamo tratte alcune considerazioni importanti.

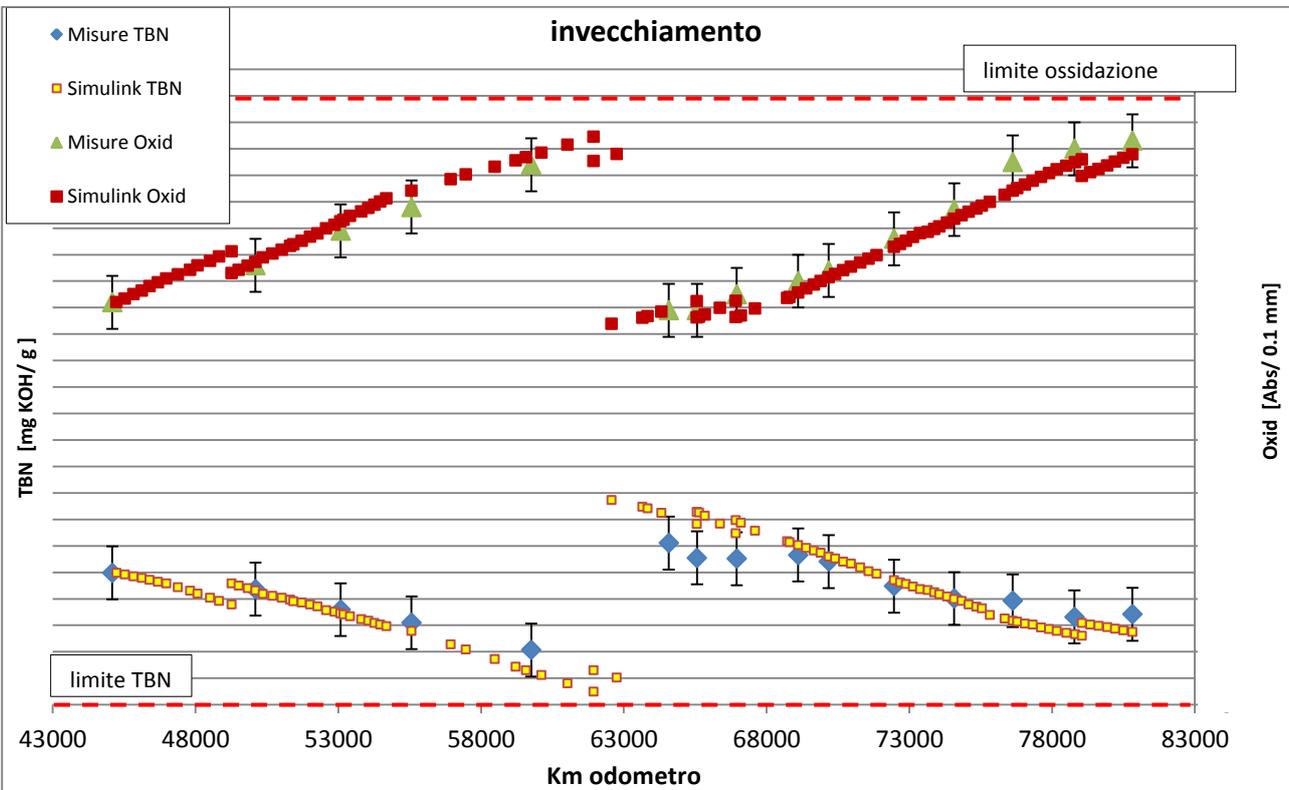
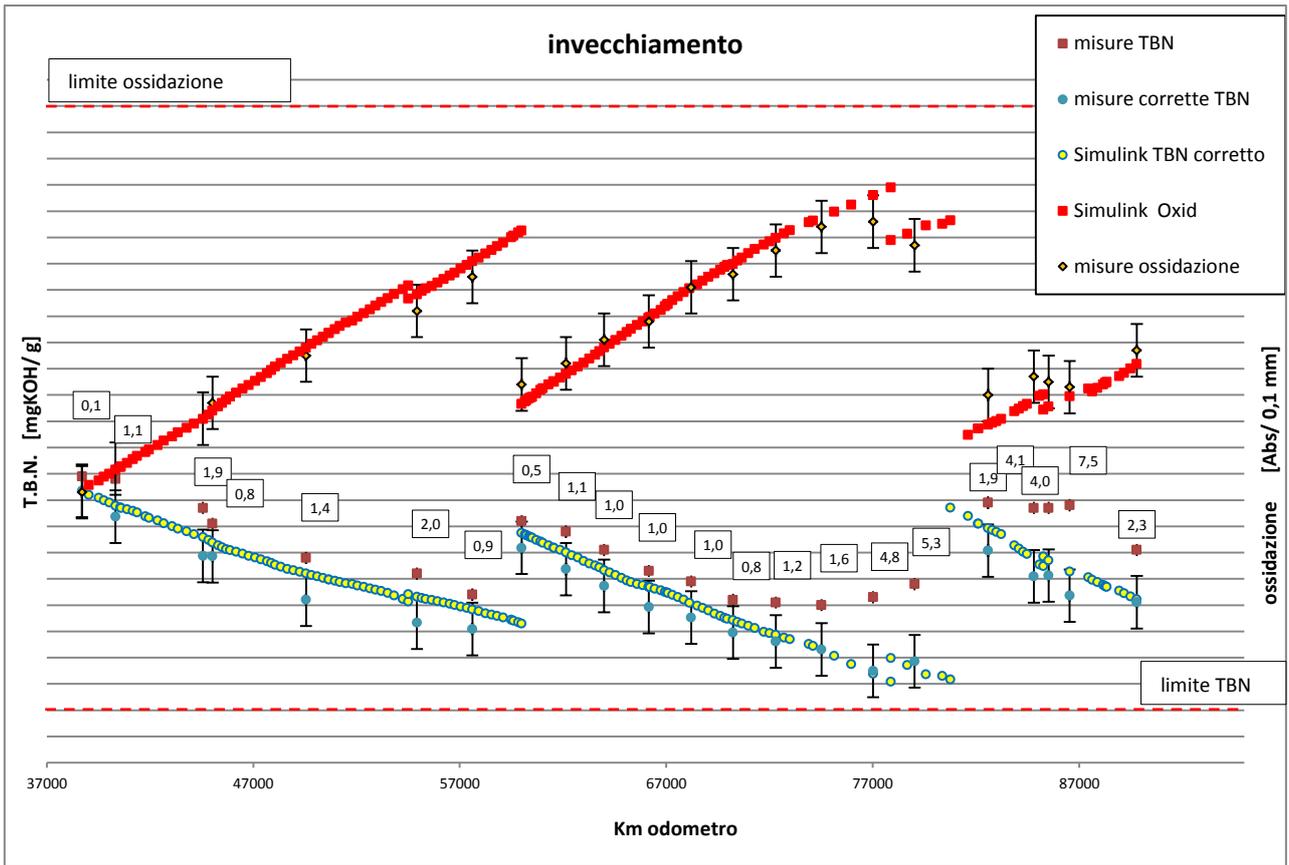


Figura 5.26) intera durata simulata per ossidazione che per TBN di due vetture;

E' interessante notare che in entrambi i casi i limiti di invecchiamento non vengono mai superati, garantendo il funzionamento in condizioni ottimali.

Notiamo anche l'influenza del lubrificante che resta intrappolato nel motore a ogni cambio olio, evidenziata dai valori iniziali.

Possiamo affermare che i valori di partenza legati al primo riempimento non saranno più riscontrati durante tutto il test.

### 5.3) Verifica analisi viscosità

Per verificare il funzionamento del modello per quanto riguarda la variazione di viscosità del lubrificante ci siamo serviti principalmente del banco prova.

Sfruttando motori a banco che stavano compiendo test di durata, la quale prevede una sequenza di manovre molto stressanti per il motore, intervallate da test che hanno il compito di verificare, a intervalli ben scanditi di tempo, il mantenimento delle prestazioni, sono stati prelevati campioni olio correlati a ogni verifica prestazioni (curva di potenza).

Come già analizzato, introducendo la fisica alla base del modello, le condizioni di funzionamento per effettuare questa misura, devono essere le più stazionarie possibili.

Nelle fasi preliminari di sviluppo del software si era pensato di compiere la misura di pressione in fase di minimo, garantendo la stabilità ricercata e assicurando, in un futuro impiego in vettura, un numero di misure sufficienti.

Procedendo però con l'analisi ci si è accorti che in tale condizioni di funzionamento il sistema non era in grado di analizzare il fenomeno.

Il sistema di lubrificazione, più precisamente la pompa, garantisce due condizioni di funzionamento, una in alta pressione che ha lo scopo di migliorare la sottrazione di calore e la lubrificazione ad alti regimi e carichi e, una seconda configurazione in bassa pressione, capace di limitare la circolazione del lubrificante in condizione di basso carico e regime per minimizzare le perdite e i trafilamenti al minimo. Queste due fasi sono ottenute mediante la variazione della cilindrata della pompa e regolazione della pressione in uscita, il comando della pompa è ad opera della centralina, in funzione di temperatura, carico e regime.

Il funzionamento a minimo carico garantisce la curva di pressione in figura 5.27 a), mentre a pieno carico, avremo la curva di figura 5.27 b).

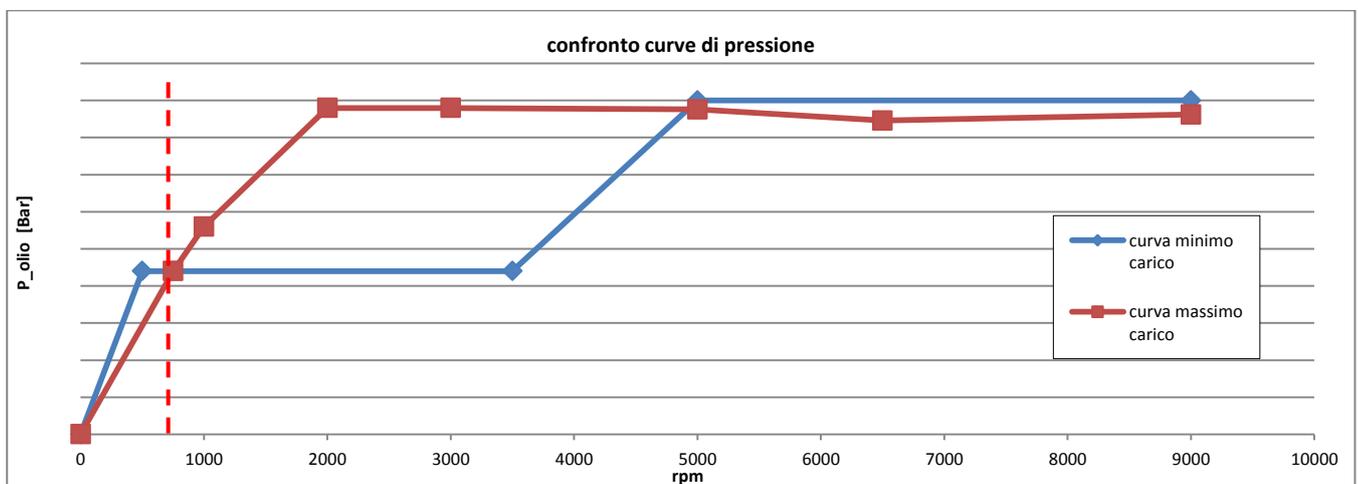


Figura 5.27) curva a carico massimo e curva a minimo carico;

Osserviamo come al minimo la pompa sia in regolazione e generi un valore di pressione costante. In questo intorno non saremo in grado di apprezzare le variazioni di pressione da associare alle variazioni di viscosità.

Per studiare il fenomeno, la pompa si deve trovare in cilindrata massima nella rampa di pressione prima della regolazione, figura 5.27 b).

Ci si attende di osservare un gradiente di pressione differente al variare della viscosità, che avrà come effetto una variazione di pressione in condizioni stazionarie, figura 5.28).

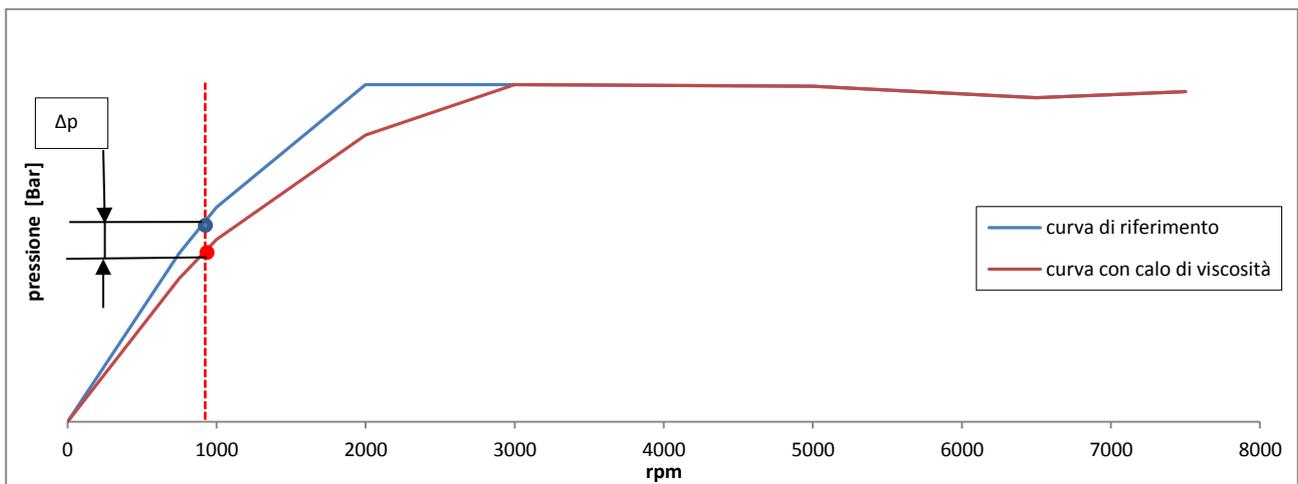


Figura 5.28) rappresentazione variazione di pressione in funzione della variazione di viscosità;

Per assicurarsi che la misura avvenga in cilindrata massima dovremo aggiungere al modello un ingresso, ovvero, il segnale di switch-off (che si attiva quando la pompa è in cilindrata massima). Otteniamo così una modifica del modello di base che assumerà la struttura riportata in figura 5.29).

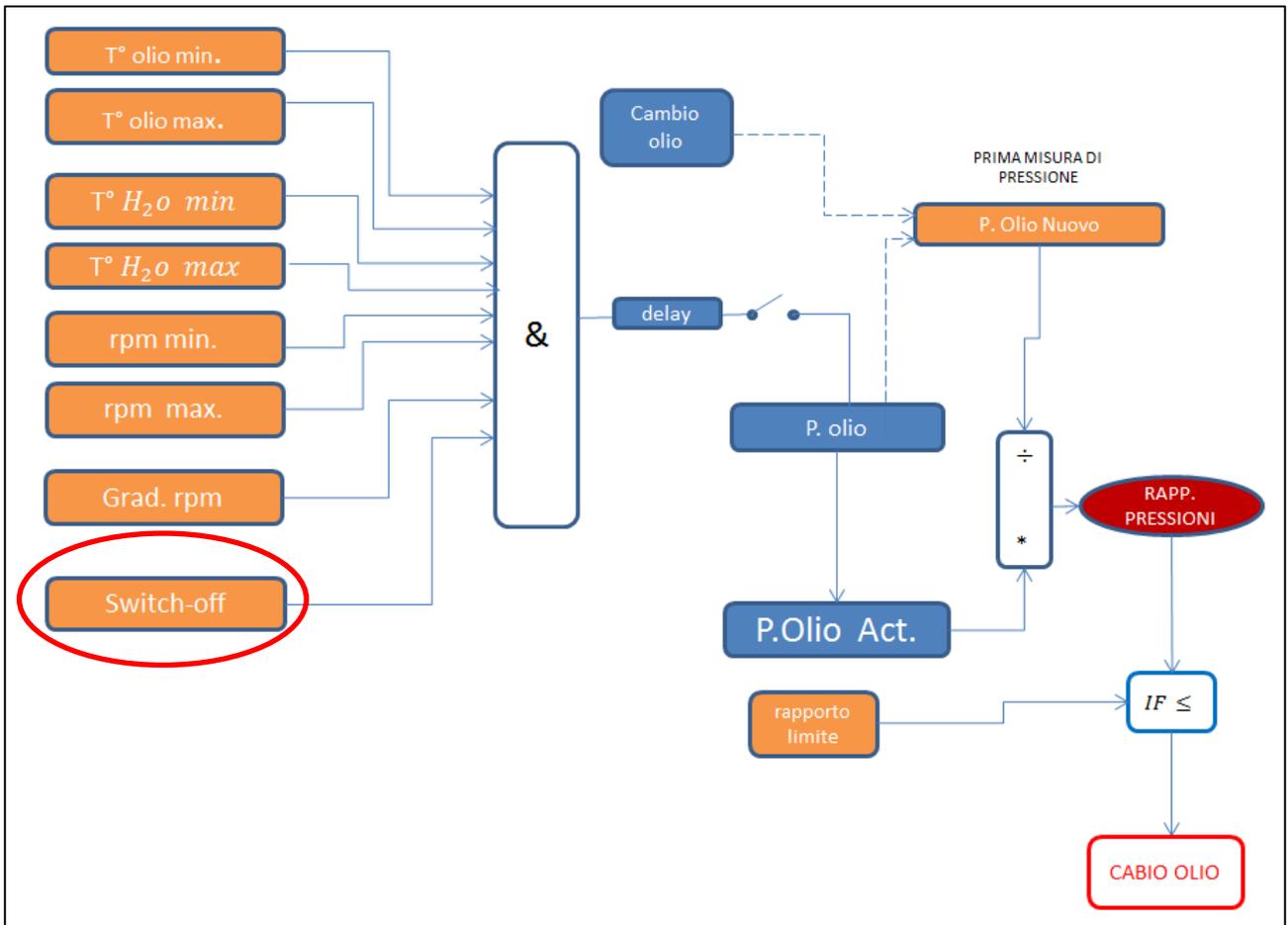


Figura 5.29) modello modificato di viscosità con l'aggiunta del segnale di switch-off;

Sebbene il sensore di pressione abbia una buona discretizzazione, in centralina il segnale è acquisito molto grossolanamente eliminando molte delle informazioni che si potrebbero ottenere.

La variazione di pressione, per il momento, è visibile solo acquisendo il segnale del sensore a banco; anche se nell'ambito dei test è difficile avere valori di diluizione paragonabili a quelli di vettura.

Da vettura, essendo vincolati ai valori di centralina di pressione, otteniamo risultati apprezzabili solo per cali di viscosità importanti, come riportato in figura 5.30).

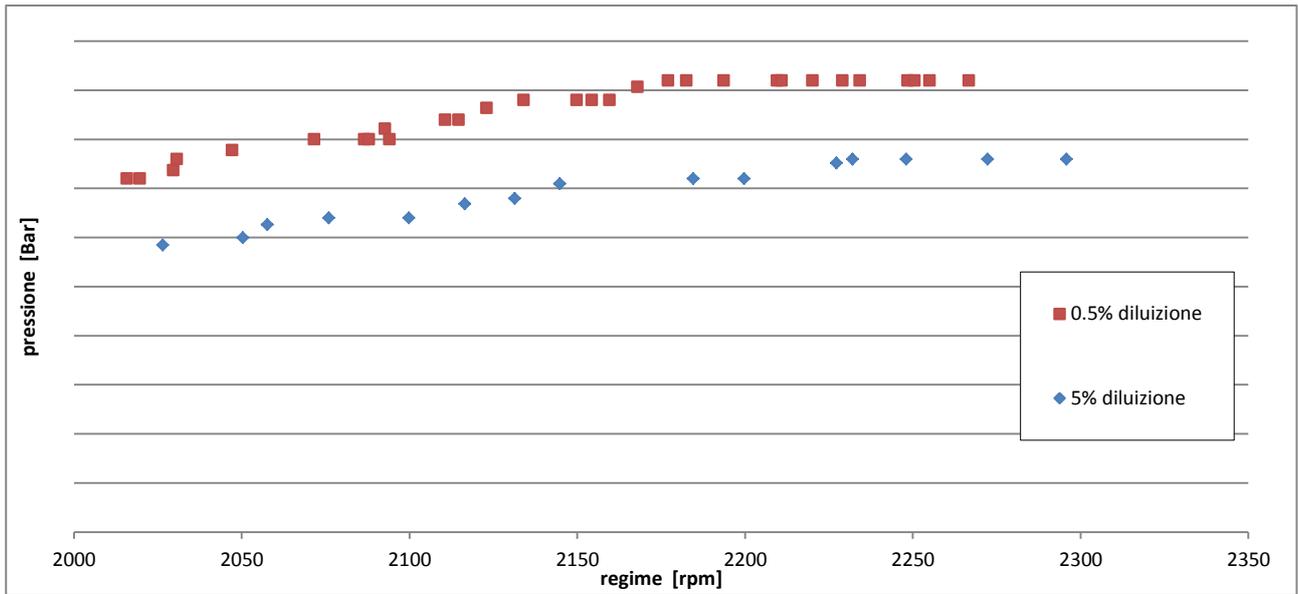


Figura 5.30) confronto curve di pressione a 5% di diluizione e 0.5%;

L'obiettivo sarà quello di migliorare la discretizzazione del sensore di pressione in centralina, per caratterizzare la variazione di viscosità.

## Capitolo 6

### Punti aperti per il futuro

Durante la fase di analisi e validazione del modello, e nell'ottica della sua estensione a tutte le famiglie di motori Ferrari, sono emersi alcuni punti ancora aperti da tenere in considerazione. La possibilità di proseguire con la caratterizzazione del degrado olio al banco prova, avrebbe l'obiettivo di rispondere a determinati quesiti di grande interesse per rendere la struttura software robusta e applicabile alle vetture circolanti.

#### 6.1) Indagine su influenza livello olio

Il modello finora sviluppato, non tiene conto del consumo olio da parte del motore durante il funzionamento.

Che incidenza possa avere sul degrado olio lo scarso riempimento del serbatoio, è una condizione tutta da studiare.

Note, dalla parte introduttiva di questo elaborato, le dinamiche d'invecchiamento del lubrificante, possiamo comunque sviluppare alcune ipotesi su quello che potrebbe accadere.

E' plausibile pensare che vi possa essere una variazione d'incidenza sull'invecchiamento legata all'energia rilasciata.

Da un punto di vista delle caratteristiche fisiche, l'aumento dell'energia rilasciata per unità di lubrificante e il conseguente incremento dello stress sul fluido, potrebbe portare a una variazione in termini di usura meccanica del lubrificante che avrebbe conseguenze sulla viscosità, ad esempio esaltando il processo di shear thinning.

Analizzando il problema da un punto di vista chimico, conseguentemente alla diminuzione di olio aumenterà la velocità di percorrenza la quale avrà effetto anche sul mescolamento tra olio e aria, incentivando il processo di ossidazione.

Allo stesso modo, una diminuzione di fluido comporta la presenza in valore assoluto inferiore sia di additivi sia di riserva basica disposta a proteggere l'olio dagli inquinanti legati al funzionamento del motore.

Si potrebbe verificare un'accelerazione dell'invecchiamento per instabilità chimica.

Confrontando due motori che compiono lo stesso test, ma con valori d'olio differenti nel circuito potremo creare sensibilità su questa condizione di funzionamento.

### **6.2) Metodo di correlazione per espandere il modello a famiglie di motori diversi**

In ottica di poter estendere il modello d'invecchiamento olio a famiglie di motori differenti risulta di strategico interesse creare una procedura di correlazione solida su cui basarsi.

La struttura software rimarrebbe del tutto inalterata, la modifica interesserebbe semplicemente i coefficienti della regressione lineare che sviluppano l'invecchiamento per instabilità chimica.

Anche in questo caso sarebbe necessario pianificare nuovi test per fare luce su quelli che possono essere i fattori principali d'interesse nell'ottica di individuare punti in comune tra differenti sistemi su cui basarsi per la ricalibrazione software.

Tutto questo potrebbe richiedere una robusta fase d'analisi e sperimentazione iniziale per consolidare un piano prove il più semplice e veloce possibile, in grado di riadattare a qualsiasi motore il modello di partenza.

### **6.3) correlazione variazione invecchiamento con usura motore**

Per applicare il modello in vettura potrebbe essere di grande interesse conoscere se e in che modo, il degrado del lubrificante è legato all'invecchiamento del motore.

E' ragionevole pensare che con l'andare del tempo, l'usura possa intervenire variando il processo.

Per una rapida analisi si potrebbe pensare di ri-generare alcune delle rette d'invecchiamento, impiegate nella fase iniziale per la generazione del modello, con un motore che ha già eseguito diverse ore di banco o/e di vettura.

Confrontando le rette sarebbe possibile apprezzare direttamente questa influenza.

#### **6.4) miglioramento mappa di TBN cold.**

La mappa di  $TBN_{cold}$ , adottata nel modello per modellare l'aumento d'acqua assorbita dall'olio per via degli avviamenti a freddo, causa di un aumento di acidi, resta forse uno dei punti più complessi da caratterizzare.

Un numero elevato di avviamenti a freddo senza mai portare l'olio alla temperatura di funzionamento (temperatura alla quale l'acqua evaporerebbe riducendo il suo effetto negativo), è indagabile per via di test a basse temperature.

Si potrebbe pensare di mantenere l'olio a temperature basse e costruire una regressione lineare per valutare l'invecchiamento in questa zona di funzionamento stimando la dipendenza da regime, coppia e temperatura olio.

Si migliorerebbe così l'attuale approssimazione che prevede una stima solo in funzione della temperatura del lubrificante.

#### **6.5) miglioramento stima degrado fisico.**

Come descritto alla fine del capitolo 5, per quanto riguarda la stima del degrado fisico, legato alla variazione di viscosità, siamo ostacolati nell'analisi dalla risoluzione in centralina del sensore di pressione.

A causa di ciò, ad oggi, non è stato ancora possibile creare una sensibilità sui risultati che il modello è in grado di fornire.

Resta pertanto un punto aperto per il futuro la caratterizzazione di questo degrado e la analisi del corretto funzionamento del software, come anche la scelta del punto motore ideale per garantire un numero adeguato di rilevazioni durante il funzionamento del motore.

La fase di debug iniziale può essere semplicemente eseguita a banco per poi essere estesa a vetture circolati una volta caratterizzato il modello e i risultati attesi.

#### **6.6) influenza sul degrado del lubrificante della componente temporale**

Per un'analisi completa del processo di degrado del lubrificante non possiamo non tenere conto della componente temporale.

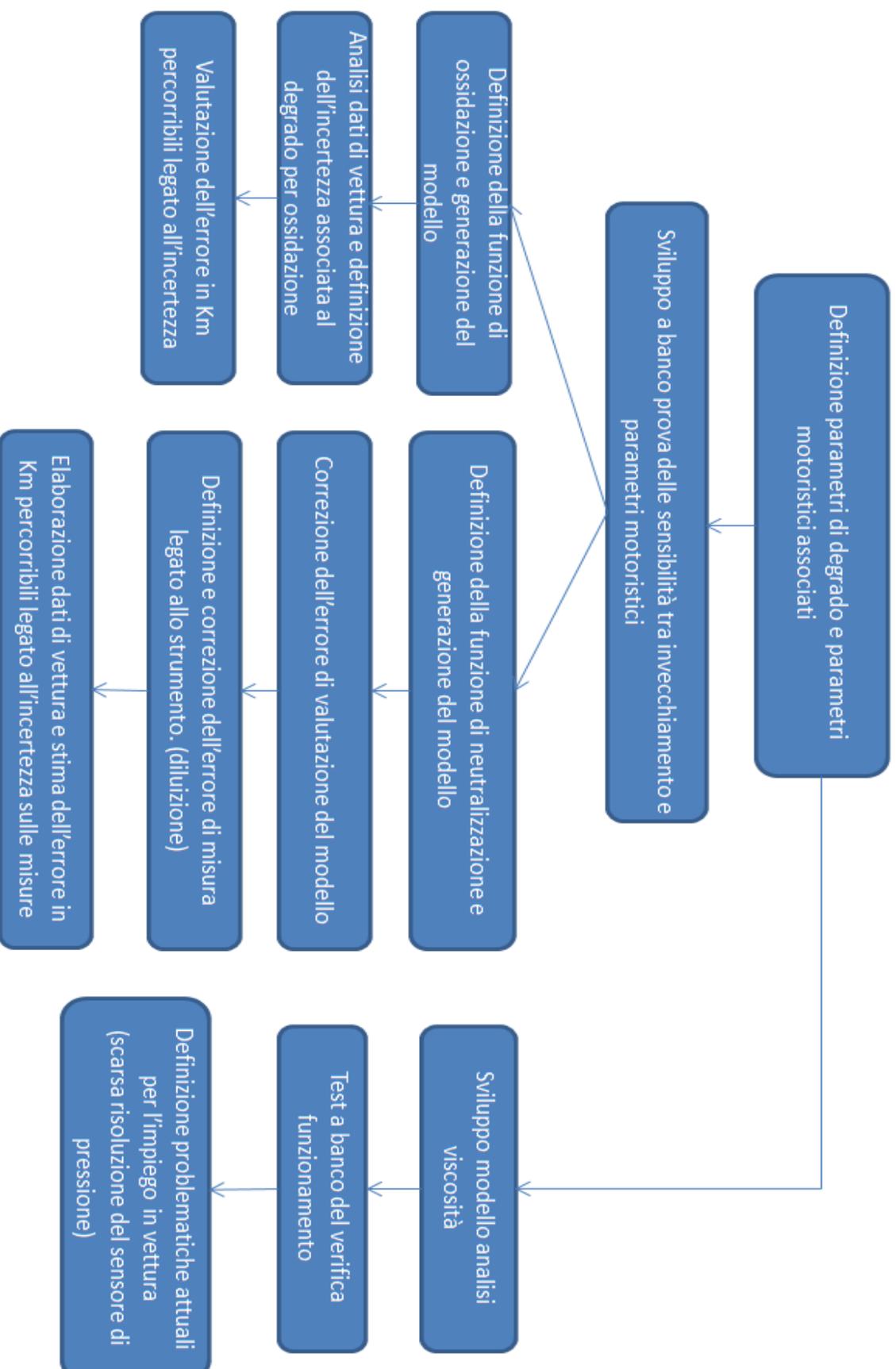
Come visto in figura 1.1) i Km percorsi mediamente dai clienti Ferrari sono dell'ordine di qualche migliaia all'anno, il che significa che non può essere trascurato il possibile invecchiamento causato dalla sola permanenza dell'olio nel motore.

Questo degrado è forse il più complesso da analizzare considerando che è presumibilmente in funzione delle condizioni di degrado in cui si trova il lubrificante.

Plausibilmente, infatti, la presenza nel lubrificante di inclusioni derivanti dal funzionamento, come acqua, residui di combustione e benzina nei periodi di fermo vettura potrebbero far proseguire il degrado aumentando il degrado per instabilità chimica.

Si potrebbe valutare un piano prove strutturato in maniera tale da analizzare campioni olio, a vari livelli di deterioramento, mantenuti per lunghi periodi in condizioni paragonabili a quelle che si creano all'interno del motore.

## Flusso delle attività svolte



## Conclusioni

Dalla mia esperienza in Ferrari nasce questo elaborato, con lo scopo di sviluppare e verificare il corretto funzionamento del modello d'invecchiamento olio, ritenuto importante dall'azienda in per la riduzione dei costi di manutenzione sui veicoli di rete.

Il software, ideato per fornire all'azienda uno strumento decisionale aggiuntivo, in grado di guidare le scelte future riguardanti la programmazione della manutenzione ordinaria, potrebbe portare l'azienda ad abbattere i costi in maniera considerevole.

Passando attraverso la definizione di degrado, per giustificare la struttura del software di modellazione basata sull'analisi di ossidazione, neutralizzazione e variazione di viscosità, siamo giunti alla fase di verifica vera e propria, effettuata con dati derivanti da vetture circolanti.

Com'è possibile apprezzare in figura 5.10), il modello è in grado di stimare in maniera abbastanza accurata il processo di ossidazione del lubrificante, con un'incertezza ritenuta accettabile.

Dai grafici 5.6), 5.7), 5.8) e 5.9), sono state estrapolate informazioni importanti per la comprensione del fenomeno e per legare al degrado un valore di Km percorribili senza oltrepassare i limiti imposti.

Vengono poi affrontate le problematiche che inizialmente affliggevano la stima del processo di neutralizzazione.

La costante sovrastima e l'influenza della diluizione sulle misure (fig. 5.14 e fig.5.13) sono state evidenziate e corrette, per migliorare il funzionamento del modello, come possiamo notare in figura 5.19) e 5.25).

Il modello è stato poi impiegato, come nel caso dell'ossidazione, per valutare la rapidità di questo degrado e la stima del suo errore per analizzare la correlazione tra misure reali e modellate su lunghe percorrenze, figura 5.20), 5.21), 5.22) e 5.23).

I risultati ottenuti, sia per il processo di ossidazione sia per il processo di neutralizzazione, permettono di approssimare il degrado per instabilità chimica su 20.000 Km con un errore massimo di circa 2000 Km.

Il modello si presenta leggermente sovrastimante con la possibilità di valutare come gestire il margine di Km/tempo associato all'errore.

Per quanto riguarda l'analisi di viscosità, è stata leggermente modificata la struttura di base del software, con l'aggiunta del segnale di switch-off della pompa.

Dai dati ottenuti, abbiamo osservato come teoricamente sia possibile eseguire quest'analisi mediante il nostro modello.

Per via della scarsa risoluzione del sensore in centralina, ad oggi, purtroppo però non siamo in grado di svolgere effettivamente con una misura accurata.

Da questo elaborato si evidenziano risultati positivi ottenuti dello sviluppo del modello d'invecchiamento olio.

Nonostante alcune imperfezioni, ancora da migliorare, sarà comunque possibile ottenere informazioni importanti sul degrado del lubrificante durante il funzionamento del motore, utili per validare le possibili modifiche da apportare ai piani di manutenzione previsti per le vetture.

## Bibliografia

“ I Lubrificanti: produzione, applicazione e mercato”  
<https://www.chimicionline.it/public//UPlubes.pdf>

“Change in Performance of Engine Oils with Degradation ” (SAE 902122)

“Degradation Pattern of Polymeric Viscosity Index Improvers in Cross-Graded Engine Lubricants”  
(SAE 2001-28-0038 )

“ Engine Oil Viscometer Based on Oil Pressure **Sensor**” ( SAE 2006-01-0701 )

“Using Oil Analysis to Control Varnish and Sludge”  
[http://www.noria.com/learning\\_center/category\\_article.asp?articleid=59](http://www.noria.com/learning_center/category_article.asp?articleid=59)

“New Varnish Test Improves Predictive Maintenance Program”  
[http://www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=761&relatedbookgroup=OilAnalysis](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=761&relatedbookgroup=OilAnalysis)

[www.machinerylubrication.com](http://www.machinerylubrication.com)

## Glossario

- [2.a] **Idrogenazione** : è una reazione chimica dove viene addizionato idrogeno ad un composto o substrato che può essere un elemento o un composto chimico, di regola in presenza di un catalizzatore.
- [2.b] **esterificazione**: E' la reazione di preparazione di un estere a partire da un alcol ed un acido; spesso l'acido è un acido carbossilico, ma anche gli acidi inorganici (acido solforico, acido fosforoso e fosforico) possono essere esterificati.  
L'acido è fatto reagire in eccesso di alcol (con sottrazione successiva di acqua ) in presenza di un catalizzatore acido. Il risultato è un estere e acqua.
- [2.c] **viscosità dinamica**: la viscosità dinamica di un fluido è una misura della resistenza a fluire quando è applicato uno sforzo tangenziale, e viene misurata in [ cP ]
- [2.d] **viscosità cinematica**: la viscosità cinematica non è altro che la viscosità dinamica diviso la densità del fluido.

# APPENDICE 1

## SCHEDE TECNICHE

### ANTON PAAR SVM 3000 G2

<b>Measuring range:</b>	
• Dynamic viscosity:	0.2 to 20 000 mPa·s
• Kinematic viscosity:	0.2 to 20 000 mm <sup>2</sup> /s
• Density:	0.65 to 3.0 g/cm <sup>3</sup>
<b>Measuring temperature:</b>	
• Maximum:	+105°C
• Minimum without cooling:	20°C below ambient temperature
• With cooling at -20°C:	-40°C (at max. 23°C/73°F room temperature)
• With cooling at -40 °C:	-56°C (at max. 23°C/73°F room temperature)
<b>Reproducibility:</b>	
• Viscosity:	±0.35% of the measured value within the works adjustment range; ±1% outside this range (depending on specific adjustment; see Chapter 8.4.3, Reference Manual on CD-ROM)
• Density:	±0.0005 g/cm <sup>3</sup> from 0.65 to 1.5 g/cm <sup>3</sup> ±0.0020 g/cm <sup>3</sup> outside this range
• Temperature:	±0.02°C (±0.04°F) from 15 to 105°C (59 to 221°F) ±0.05°C (±0.09°F) outside this range
<b>Repeatability:</b>	
• Viscosity:	±0.1% of the measurement value
• Density:	±0.0001 g/cm <sup>3</sup>
• Temperature:	±0.005°C
<b>Environmental conditions (EN 61010):</b> Indoor use only	
• Max. pressure in the measuring cell:	150000 Pa (1.5 bar = 22 psi) overpressure
• Ambient temperature:	+5 to +35°C
• Air humidity:	10 to 80% relative humidity for temperatures up to 31°C (88°F) decreasing linearly to 67% relative humidity at 35°C (95°F)
• Pollution degree:	2
• Overvoltage category:	II
<b>Min. sample volume:</b>	
• dynamic viscosity only	approx. 1.0 ml
• density and viscosity	approx. 2.5 ml
<b>Materials in contact with the sample:</b> PTFE, PEEK, Hastelloy C276, titanium, stainless steel A4, Viton 980 Extreme, borosilicate glass	
<b>Sample throughput:</b>	
• Displacement:	up to 20 per hour (at constant temperature)
• Rinsing and drying:	up to 15 per hour (at constant temperature) up to 20 per hour when using compressed air for drying
• Viscosity Index measurement	approx. 3 per hour
<b>Dimensions (L x W x H):</b> 440 x 315 x 220 mm	
<b>Weight:</b> approx. 16 kg	
<b>Mains connection:</b> 85 to 264 VAC 48 to 62 Hz 55 W	
<b>Fuses:</b> Glass tube fuses 5 x 20 mm, 250V DIN 41662, T 1A, slow blow	
<b>Computer interface (PC):</b> RS 232 C;	
<b>Printer interface (Printer):</b> 1200 to 19200 baud; 1 or 2 stop bits; 7 or 8 data bits; no, even or odd parity handshake: RTS/CTS, Xon/Xoff, none	
<b>Keyboard interface:</b> PC/AT	

Tab. 1 – Scheda tecnica Anton Paar SVM 3000 G2

## ***SPECTROIL M***

<b>SPECTROIL ACCESSORIES AND OPTIONS</b>	
<b>Standard Configuration</b>	Standard oil calibration, 23 Elements Al, Ba, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, P, K, Si, Ag, Na, Sn, Ti, V, Zn, Li
<b>Calibration Options</b>	Coolant Calibration Program Washdown Water Calibration Program Fuel Calibration (light Fuel, Heavy Fuel) Program Sulfur Calibration (Sulfur Optics Required) Program Additional 9 Elements Calibration (Sb, Bi, As, In, Co, Zr, W, Sr, Ce)
<b>Hardware Configurations</b>	ARFS (Large Particle Analysis) D2R2 Robotic Automation Sulfur Optics for Fuel Analysis
<b>Operating Software</b>	Spectroil M
<b>Optional LIMS data trending</b>	SpectroTrack IMS

Tab. 2 – Scheda tecnica Spectroil M

## FLUIDSCAN Q1000

PRODUCT INFORMATION			OPERATIONAL SPECIFICATIONS	
Part Number	FluidScan-Q1000	FluidScan Q1000 (requires #SA1001 and Library license to operate)	Sample Volume	0.03µL (about 1-2 drops)
	SA1001	FluidScan standard accessories	Solvents/Reagents	None
	Spectro Q1000/Q3050	FluidScan Q1000 & Q3050 Viscometer Combination Kit (requires #SA1004 and Library license to operate)	Ambient Operating Temperature	10°C to 50°C (14°F to 122°F)
	SA1004	Spectro Combination Kit standard accessories	Relative Humidity	0 to 100%, non-condensing
			Ambient Altitude	up to 5,000 meters (16,404 feet)
FluidScan Oil Libraries			USER INTERFACE SPECIFICATIONS	
	P/N	LIBRARY	Software/Operating System	Microsoft Windows® CE
(One library license is included. Specify part number at time of order or purchase full library license.)	FL364	Automotive	Display	320 x 320 transfective color screen
	FL365	Aviation	Data Storage	Up to 5,000 analyses
	FL366	Fuel OC	Data Transfer	USB for data updates and synchronization
	FL367	Industrial	Data Entry	Directional pad and soft buttons
	FL368	Lab Trend	POWER REQUIREMENTS	
	FL369	Maritime	Battery Power Source	Built in Rechargeable Lithium Ion Battery
	FL370	Military	Power	AC 110/240 V, 50/60 Hz, 10 Watts
	FL371	Railroad	Typical Runtime	6-8 hours
FL360	All Libraries	Recharge Time	6.5 hrs	
ACCESSORIES & CONSUMABLES			MECHANICAL SPECIFICATIONS	
FL310	IR Check Fluid 5mL		Dimensions	240 mm (H) x 140 mm (W) x 70 mm (D) (9.5 in x 5.5 in x 2.75 in)
PV1011	Disposable Non-Abrasive Cleaning Pads; package of 500		Weight	1.4 kg (3 lbs)
P-11052	60 µL Disposable Pipettes, package of 500		Shipping package dimensions	17.1 cm (H) x 6.3 cm (W) x 5.5 cm (L); (18 in x 16 in x 14 in)
PV1012	60 µL Disposable Pipettes & Non-Abrasive Cleaning Pad kit; pkg. of 100 each		Shipping package weight	8.1 kg, (18 lbs)
PRODUCT SPECIFICATIONS			COMPLIANCE	
Output (varies by fluid type and application)	TAN (mgKOH/g), TBN (mgKOH/g; Oxidation (abs/0.1mm); Nitration (abs/cm); Sulfation (abs/0.1mm); Water (PPM); Glycol (%); Soot (%); Incorrect Fluid (%); Antioxidant Depletion (%); Antiwear Depletion (%)) (varies by fluid type and application)			
Standard Analytical Range	Mid Infrared range 900 cm <sup>-1</sup> to 3700 cm <sup>-1</sup>			
Accuracy	± 3% of measured value, typical			
Repeatability	± 6% of measured value, typical			
Calibration	Factory calibrated; check fluid as needed			
			CE Mark: EMC Directive (2004/108/EC); RoHS	

Tab. 3 – Scheda tecnica FluidScan Q1000

## APPENDICE 2

### NORME

#### *ASTM D 664*



Designation: D 664 – 04

An American National Standard  
British Standard 4457



Designation 177/96

#### **Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration<sup>1</sup>**

This standard is issued under the fixed designation D 664; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

#### *ASTM D 2270*



Designation: D 2270 – 04

An American National Standard  
British Standard 4459



Designation: 226/91 (95)

#### **Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100°C<sup>1</sup>**

This standard is issued under the fixed designation D 2270; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

## ***Ringraziamenti***

*Alla fine di questo elaborato sono doverosi i ringraziamenti a chi, direttamente o indirettamente, ha contribuito a questo percorso e più in generale a chi ha contribuito all'intero percorso universitario che si conclude oggi.*

*Voglio ringraziare in primis la mia famiglia e mia mamma Viviana, mio padre Bruno e mio fratello Francesco per il supporto che in questo lungo e a volte duro percorso mi hanno sempre saputo dare; e poi i nonni per me grandi esempi di forza di volontà e attaccamento alla vita.*

*La mia "morosa" Jessica, che con pazienza e determinazione ha saputo percorrere con me questi anni divisi tra studio e lavoro, sempre al mio fianco nonostante tutto.*

*Ringrazio infine l'azienda che mi ha ospitato durante il percorso di tirocinio e tesi Ferrari S.p.A. Qui ho avuto il piacere di conoscere persone determinate, appassionate e laboriose che rappresentano la vera anima di questa società e di questo paese, il quale troppo spesso si dimentica che siamo unici nel produrre attraverso la passione.*

*Parlando di passione voglio ringraziare il Professor. Nicolò Cavina, mio relatore. Grazie a lui vivono all'interno della facoltà di Bologna realtà importanti che portano i giovani ingegneri a confrontarsi con colleghi da tutto il mondo che condividono la medesima passione per i motori e le competizioni. La passione da lui dimostrata nell'insegnamento e l'impegno a trasmettere a noi tutti non solo nozioni, ma l'amore in ciò che si fa è stata per me fonte d'ispirazione.*

*Grazie a tutti...*

*Michele Morara*

*Bologna 14 Giugno 2018*